



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK  
AKIBAT INTEGRASI PABRIK I, II, III, UNIT BATU BARA DAN  
PLN MENGGUNAKAN SISTEM DISTRIBUSI RING**

Muhammad Wimas Adhyatma  
NRP 2213105066

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**TRANSIENT STABILITY ANALYSIS IN PT. PETROKIMIA GRESIK  
DUE TO THE INTEGRATION OF FACTORY I, II, III, COAL UNIT  
AND PLN USING RING DISTRIBUTION SYSTEM**

Muhammad Wimas Adhyatma  
NRP 2213105066

Advisor  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015

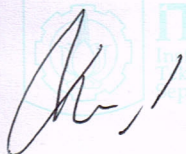
**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA  
GRESIK AKIBAT INTEGRASI PABRIK I, II, III, UNIT BATU  
BARA DAN PLN MENGGUNAKAN SISTEM DISTRIBUSI RING**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

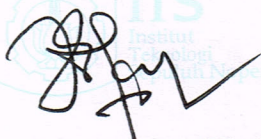
**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

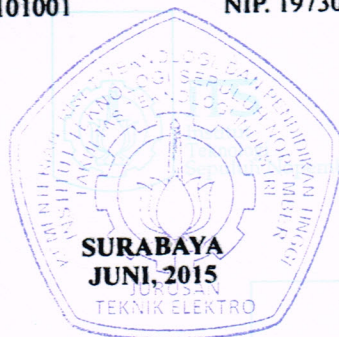


**Dr. Ir. Margo Pujiatara, MT.**  
**NIP. 196603181990101001**

**Dosen Pembimbing II**



**Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.**  
**NIP. 197309271998031004**



# **Analisis Kestabilan Transien di PT. Petrokimia Gresik Akibat Integrasi Pabrik I, II, III, Unit Batu Bara dan PLN Menggunakan Sistem Distribusi Ring**

Nama : Muhammad Wimas Adhyatma  
NRP : 2213105066  
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

## **ABSTRAK**

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan daya pembangkitan dengan daya pembebanan dalam sistem. Dalam keadaan ini, semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Gangguan-gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba seperti lepasnya pembangkit, *starting motor* daya besar, dan hubung singkat mampu mengakibatkan percepatan ataupun perlambatan putaran rotor sehingga hilangnya sinkronisasi dapat terjadi pada sistem kelistrikan.

Integrasi pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik menggunakan sistem distribusi ring memiliki kelebihan yaitu penyaluran daya listrik yang dapat disuplai melalui dua generator atau lebih. Respon kestabilan sistem tenaga listrik di PT. Petrokimia Gresik dilakukan untuk mengetahui respon sistem akibat adanya gangguan secara tiba-tiba sehingga rekomendasi kestabilan yang handal dapat ditentukan.

Respon kestabilan pada periode transien dapat diamati melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada kondisi normal maupun gangguan. Untuk mengetahui batas kestabilan yang baik pada sistem kelistrikan suatu industri, maka ditetapkan standar batas kemampuan normal frekuensi, tegangan, dan sudut rotor. Standar yang digunakan mengacu pada IEEE Std C37.106-2003 (Revisi dari ANSI/IEEE C37.106-1987) mengenai pengamanan frekuensi abnormal turbin dengan menggunakan metode pelepasan beban.

**Kata Kunci:** Kestabilan Transien, Pelepasan Beban, PT. Petrokimia Gresik, Distribusi Ring.



# **Analisis Kestabilan Transien di PT. Petrokimia Gresik Akibat Integrasi Pabrik I, II, III, Unit Batu Bara dan PLN Menggunakan Sistem Distribusi Ring**

Nama : Muhammad Wimas Adhyatma  
NRP : 2213105066  
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

## **ABSTRAK**

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan daya pembangkitan dengan daya pembebanan dalam sistem. Dalam keadaan ini, semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Gangguan-gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba seperti lepasnya pembangkit, *starting motor* daya besar, dan hubung singkat mampu mengakibatkan percepatan ataupun perlambatan putaran rotor sehingga hilangnya sinkronisasi dapat terjadi pada sistem kelistrikan.

Integrasi pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik menggunakan sistem distribusi ring memiliki kelebihan yaitu penyaluran daya listrik yang dapat disuplai melalui dua generator atau lebih. Respon kestabilan sistem tenaga listrik di PT. Petrokimia Gresik dilakukan untuk mengetahui respon sistem akibat adanya gangguan secara tiba-tiba sehingga rekomendasi kestabilan yang handal dapat ditentukan.

Respon kestabilan pada periode transien dapat diamati melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada kondisi normal maupun gangguan. Untuk mengetahui batas kestabilan yang baik pada sistem kelistrikan suatu industri, maka ditetapkan standar batas kemampuan normal frekuensi, tegangan, dan sudut rotor. Standar yang digunakan mengacu pada IEEE Std C37.106-2003 (Revisi dari ANSI/IEEE C37.106-1987) mengenai pengamanan frekuensi abnormal turbin dengan menggunakan metode pelepasan beban.

**Kata Kunci:** Kestabilan Transien, Pelepasan Beban, PT. Petrokimia Gresik, Distribusi Ring.



# ***Transient Stability Analysis in PT. Petrokimia Gresik due to The Integration of Factory I, II, III, Coal Unit and PLN Using Ring Distribution System***

*Name* : Muhammad Wimas Adhyatma  
*NRP* : 2213105066  
*Advisor Lecturer* : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

## **ABSTRACT**

*Transient stability is the ability of the power system to maintain synchronization and balance between the power of generation with the power on the load system. In this state, generators rotate at a synchronous speed. Large disturbances that occur suddenly such as loss of generation, large power motor starting and short circuit are capable of resulting in the acceleration and deceleration at the rotor rotation which cause loss of synchronization in electrical systems.*

*The integration of the electrical system in PT. Petrokimia Gresik using ring distribution system has the advantage that the distribution of electric power can be supplied through two or more generators. Response stability of the power system in PT. Petrokimia Gresik is performed to determine the system response due to sudden disturbance so that reliable stability recommendations can be applied.*

*Response stability on the transient period can be observed through the frequency response, voltage and rotor angle in normal and disturbance conditions. To determine the limits of good stability on an industrial electrical systems, then the standard limits are confirmed normal frequency, voltage and rotor angle ability. The standards that used are based on IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987) on securing the abnormal frequency turbine using load shedding method.*

**Keywords:** *Transient Stability, Load Shedding, PT. Petrokimia Gresik, Ring Distribution.*





## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang mana atas rahmat dan hidayah-Nya maka penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

### **“ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK AKIBAT INTEGRASI PABRIK I, II, III, UNIT BATU BARA DAN PLN MENGGUNAKAN SISTEM DISTRIBUSI RING”**

Tugas Akhir ini merupakan karya tulis ilmiah yang menjadi salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak membantu terutama dalam penyusunan Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Kedua orang tua atas limpahan doa, kasih sayang, dan teladan hidup bagi penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Seluruh rekan Teknik Sistem Tenaga LJ-2013 Gasal atas kebersamaannya.
4. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS & D3 Teknik Elektro Komputer Kontrol ITS.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini belum sempurna. Kritik dan saran pembaca diharapkan mampu memperbaiki kekurangan penulis dalam pembuatan laporan ini. Semoga terselesaikannya Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis serta pembaca secara luas. Terima kasih.

Surabaya, Juni 2015

Muhammad Wimas Adhyatma





# DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan Jurusan.....	iii
Abstrak .....	v
<i>Abstract</i> .....	vii
Kata Pengantar.....	ix
Daftar Isi.....	xi
Daftar Gambar .....	xv
Daftar Tabel.....	xvii

## BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Laporan.....	4
1.7 Relevansi .....	5

## BAB II. KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	7
2.1.1 Jaringan Distribusi Ring .....	8
2.2 Definisi Kestabilan Transien .....	9
2.3 Klasifikasi Kestabilan .....	13
2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor ( <i>Rotor Angle Stability</i> ).....	14
2.3.1.1 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Kecil ( <i>Small-Disturbance Angle Stability</i> ) .....	14
2.3.1.2 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Besar ( <i>Large-Disturbance Angle Stability/Transient Stability</i> ).....	14
2.3.2 Kestabilan Frekuensi ( <i>Frequency Stability</i> ).....	15
2.3.3 Kestabilan Tegangan ( <i>Voltage Stability</i> ).....	15

2.3.3.1	Kestabilan Tegangan Gangguan Kecil ( <i>Small-Disturbance Voltage Stability</i> ) .....	16
2.3.3.2	Kestabilan Tegangan Gangguan Besar ( <i>Large-Disturbance Voltage Stability</i> ) .....	16
2.3.3.2.1	Kestabilan Tegangan Jangka Pendek ( <i>Short Term Voltage Stability</i> ) .....	16
1)	Kedip Tegangan ( <i>Voltage Sag</i> ) .....	16
2)	Kenaikan Tegangan ( <i>Voltage Swell</i> ) .....	17
2.3.3.2.2	Kestabilan Tegangan Jangka Lama ( <i>Long Term Voltage Stability</i> ) .....	17
1)	Tegangan Lebih ( <i>Over Voltage</i> ) .....	18
2)	Tegangan Kurang ( <i>Under Voltage</i> ) .....	18
2.4	Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan ( <i>Rotor Dynamics and The Swing Equation</i> ) .....	19
2.5	Standar Kestabilan Transien .....	23
2.5.1	Standar Kemampuan Frekuensi Abnormal Turbin .....	23
2.5.2	Standar Batas Operasi Tegangan .....	25
2.5.3	Standar Pelepasan Beban ( <i>Load Shedding</i> ) .....	25
<b>BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK</b>		
3.1	Sistem Kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik .....	29
3.2	Motor Induksi MC-1301 (4000 kW) di PT. Petrokimia Gresik .....	32
<b>BAB IV. SIMULASI &amp; ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK</b>		
4.1	Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik .....	35
4.2	Perencanaan Studi Kasus PT. Petrokimia Gresik .....	35
1)	Generator Lepas/ <i>Generator Outage</i> .....	36
2)	<i>Starting Motor</i> .....	36

3) Hubung Singkat/ <i>Short Circuit</i> .....	36
4.3 Simulasi Kestabilan Transien.....	38
4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas/ <i>Generator Outage</i> .....	38
4.3.1.1 1Gen.OFF : 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ).....	39
4.3.1.2 1Gen.OFF + LS1 : 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load <i>shedding 1</i> (LS1).....	41
4.3.1.3 2Gen.OFF : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ).....	43
4.3.1.4 2Gen.OFF + LS1 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load <i>shedding 1</i> (LS1).....	46
4.3.1.5 2Gen.OFF + LS2 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load <i>shedding 2</i> (LS2).....	48
4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien <i>Starting Motor</i> .....	50
4.3.2.1 MS1 : 1 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 1 detik ( $t=1s$ ).....	50
4.3.3 Simulasi Kestabilan Transien Hubung Singkat / <i>Short Circuit</i> .....	53
4.3.3.1 SC1 : Hubung Singkat/ <i>Short Circuit 1</i> (SC1) .....	53
4.3.3.2 SC2 : Hubung Singkat/ <i>Short Circuit 2</i> (SC2) .....	55
4.4 Rekapitulasi Data Kestabilan di PT. Petrokimia Gresik.....	58
<b>BAB V. PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	63
<b>LAMPIRAN</b> .....	A - 1
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	B - 1



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Standar pelepasan beban 3 langkah (60Hz) .....	26
<b>Tabel 2.2</b> Standar pelepasan beban 6 langkah (60Hz) .....	26
<b>Tabel 2.3</b> Standar pelepasan beban 3 langkah (50Hz) .....	26
<b>Tabel 2.4</b> Standar pelepasan beban 6 langkah (50Hz) .....	27
<b>Tabel 3.1</b> Data spesifikasi generator di PT. Petrokimia Gresik .....	29
<b>Tabel 3.2</b> Data spesifikasi trafo di PT. Petrokimia Gresik .....	31
<b>Tabel 3.3</b> Data motor tegangan menengah (6 kV) di Pabrik III, PT. Petrokimia Gresik .....	32
<b>Tabel 4.1</b> Studi kasus sistem pada PT. Petrokimia Gresik .....	36
<b>Tabel 4.2</b> Rekapitulasi data <i>load shedding</i> .....	58
<b>Tabel 4.3</b> Rekapitulasi data studi kasus generator lepas .....	58
<b>Tabel 4.4</b> Rekapitulasi data studi kasus <i>starting motor</i> .....	58
<b>Tabel 4.5</b> Rekapitulasi data studi kasus hubung singkat .....	59





## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 1.1</b> <i>Flowchart</i> Tugas Akhir .....	3
<b>Gambar 2.1</b> Garis besar sistem tenaga listrik .....	11
<b>Gambar 2.2</b> Perilaku generator saat terjadi gangguan .....	11
<b>Gambar 2.3</b> Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik .....	13
<b>Gambar 2.4</b> Representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektrik (a) Generator (b) Motor .....	20
<b>Gambar 2.5</b> Standar batas operasi turbin uap ( <i>Over/Under frequency</i> ) .....	23
<b>Gambar 2.6</b> Standar batas operasi gas turbin ( <i>Over/Under frequency</i> ) .....	24
<b>Gambar 2.7</b> Standar batas operasi tegangan kestabilan transien .....	25
<b>Gambar 3.1</b> Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik .....	30
<b>Gambar 4.1</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem .....	39
<b>Gambar 4.2</b> Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem .....	40
<b>Gambar 4.3</b> Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem .....	40
<b>Gambar 4.4</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1) .....	41
<b>Gambar 4.5</b> Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1) .....	42
<b>Gambar 4.6</b> Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1) .....	43
<b>Gambar 4.7</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem .....	44
<b>Gambar 4.8</b> Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem .....	44
<b>Gambar 4.9</b> Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem .....	45
<b>Gambar 4.10</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 1 (LS1) .....	46

<b>Gambar 4.11</b>	Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 1 (LS1).....	47
<b>Gambar 4.12</b>	Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 1 (LS1).....	47
<b>Gambar 4.13</b>	Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 2 (LS2).....	48
<b>Gambar 4.14</b>	Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 2 (LS2).....	49
<b>Gambar 4.15</b>	Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 2 (LS2).....	49
<b>Gambar 4.16</b>	Respon frekuensi ketika motor MC-1301 <i>start</i> dari sistem.....	51
<b>Gambar 4.17</b>	Respon tegangan ketika motor MC-1301 <i>start</i> dari sistem.....	51
<b>Gambar 4.18</b>	Respon sudut rotor ketika motor MC-1301 <i>start</i> dari sistem.....	52
<b>Gambar 4.19</b>	Respon frekuensi ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat .....	53
<b>Gambar 4.20</b>	Respon tegangan ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat .....	54
<b>Gambar 4.21</b>	Respon sudut rotor ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.....	54
<b>Gambar 4.22</b>	Respon frekuensi ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat .....	55
<b>Gambar 4.23</b>	Respon tegangan ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat .....	56
<b>Gambar 4.24</b>	Respon sudut rotor ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat .....	57

## BIODATA PENULIS



Nama : M. Wimas Adhyatma  
TTL : Gresik, 11 Agustus 1990  
Jenis Kelamin : Laki - laki  
Agama : Islam  
Alamat Rumah: Puri Taman Asri D-9,  
Sepanjang – Taman,  
Sidoarjo  
Telp./HP : 085645524751  
E-mail : wimas10@mhs.ee.its.ac.id  
m.wimas.a@gmail.com  
Hobi : Olahraga

### RIWAYAT PENDIDIKAN

- 1997 – 2003 : SD NEGERI MENANGGAL 601 SURABAYA
- 2003 – 2006 : SMP NEGERI 1 SURABAYA
- 2006 – 2009 : SMA NEGERI 6 SURABAYA
- 2010 – 2013 : Bidang Studi Komputer Kontrol, Program D3 Teknik Elektro, ITS
- 2013 – sekarang : Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Program Lintas Jalur S1 Teknik Elektro, ITS

### PRESTASI AKADEMIK

- Juara 2 kompetisi pengembangan aplikasi, *Sepuluh Nopember IT Challenge* 2013 (SNITCH 2013).
- Finalis 10 besar tingkat Nasional kategori *embedded system*, Pagelaran Mahasiswa Nasional Bidang TIK 6 (GEMASTIK 6) 2013, Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (DIKTI) 2013.

### PENGALAMAN ORGANISASI

- Anggota SKI SMA NEGERI 6 SURABAYA periode 2006 – 2007
- Panitia kejuaraan *badminton* antar SMA se-Jawa Timur tahun 2010





# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Pada pengoperasian sistem tenaga listrik, hampir setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas dan letak beban dalam sistem yang sedang beroperasi. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan maka mampu menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun sehingga mengakibatkan kinerja sistem memburuk.

Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali dapat dikatakan handal jika mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Apabila semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan terutama gangguan besar, maka sistem tersebut termasuk kategori sistem yang stabil.

Pada situasi dimana adanya penambahan kapasitas pembangkit dengan daya cukup besar atau beban besar hilang dari sistem atau bahkan terjadi gangguan pada saluran transmisi, stabilitas transien harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap perubahan beban yang relatif besar terjadi. Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, maka keseimbangan antara energi yang masuk dan energi yang keluar pada sistem akan hilang. Jika suplai energi melebihi kapasitas beban yang dipikul, respon inersia rotor mesin yang masih bekerja pada periode yang singkat akan melambat. Sebaliknya apabila beban hilang maka daya pada sistem akan melebihi beban sehingga mesin akan bergerak semakin cepat. Gangguan pada sistem biasanya diikuti oleh perubahan tegangan yang cepat pada sistem, dan pemulihan kembali tegangan dengan cepat menuju ke kondisi normal merupakan salah satu hal yang penting untuk mempertahankan stabilitas selain respon frekuensi sistem dan sudut rotor generator pembangkit.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas berkaitan dengan Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Analisis kestabilan sistem melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akibat adanya gangguan besar seperti lepasnya pembangkit, *starting motor*, dan hubung singkat secara tiba-tiba dengan menggunakan standar ANSI/IEEE.
2. Menentukan skema pelepasan beban yang handal berdasarkan kondisi sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dari beberapa studi kasus seperti generator lepas, *starting motor*, dan hubung singkat.

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam penyelesaian masalah dalam Tugas Akhir ini, terdapat batasan-batasan sebagai berikut:

1. *Software* yang digunakan adalah ETAP 12.6
2. Kestabilan sistem yang dianalisis merupakan kestabilan ketika terjadi *trip* pada pembangkit, *starting motor*, dan hubung singkat
3. Gangguan beban berlebih terjadi karena adanya *trip* pada unit pembangkit di PT. Petrokimia Gresik.
4. Skema perbaikan sistem kelistrikan yang dilakukan yaitu menggunakan skema pelepasan beban (*load shedding*)

## 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini antara lain:

1. Mengetahui pengaruh respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem akibat adanya *trip* pada pembangkit, *starting motor*, dan hubung singkat pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik
2. Melaksanakan studi kestabilan di PT. Petrokimia Gresik untuk mendapatkan rekomendasi yang sesuai sehingga gangguan-gangguan yang terjadi dapat diamankan dengan baik.
3. Merancang skema pelepasan beban yang handal sehingga sistem dapat segera kembali ke kondisi stabil.
4. Dapat menentukan langkah-langkah/solusi yang harus dilakukan akibat adanya gangguan pada sistem.



## 1.5 Metodologi

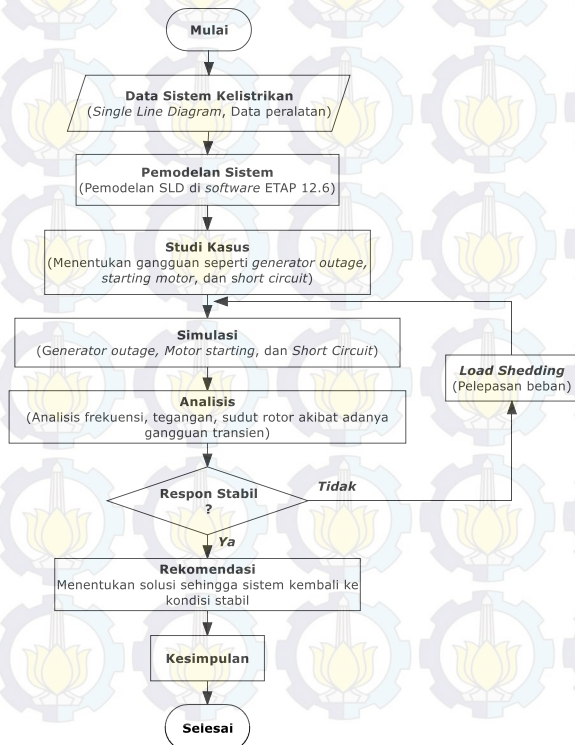
Metodologi yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan Data

Penulis melakukan pengambilan data berupa data pembangkitan maupun parameter-parameter seperti spesifikasi peralatan, data saluran, dan sebagainya.

2. Pemodelan Sistem

Setelah proses pengumpulan data mulai data pembangkitan, data peralatan, dan impedansi saluran maka sistem dimodelkan kedalam *Single Line Diagram*. Berikut pada Gambar 1.1 merupakan *flowchart* secara umum dalam penyelesaian Tugas Akhir ini:



**Gambar 1.1** Flowchart Tugas Akhir

### 3. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil simulasi program dan analisis data yang dilakukan, penulis dapat menarik kesimpulan berdasarkan analisis sistem sehingga solusi dari permasalahan pada Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.

## 1.6 Sistematika Laporan

Dalam penyusunan buku tugas akhir ini, pembahasan mengenai sistem alat yang dibuat dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

### 1. BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi penjelasan umum mengenai latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika laporan, dan relevansi yang berkaitan dengan Tugas Akhir ini.

### 2. BAB II. KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Berisi penjelasan teori dasar mengenai konsep yang digunakan dalam analisis kestabilan transien di PT. Petrokimia Gresik. Teori dasar mengacu pada standar IEEE yaitu ANSI/IEEE C37.106-1987 mengenai skema pelepasan beban, IEEE Std C37.106™-2003 (*Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987*) mengenai panduan frekuensi abnormal generator pada pembangkit, dan IEEE Std 1159-1995 yang berkaitan dengan standar batas tegangan normal operasi serta gangguan-gangguan yang dapat ditimbulkan. Selain itu juga akan dibahas teori yang berkaitan dengan kestabilan transien, perancangan pelepasan beban, sistem distribusi ring, dan sebagainya.

### 3. BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

Pembahasan secara detail mengenai data peralatan dan informasi secara umum mengenai sistem kelistrikan yang ada di PT. Petrokimia Gresik. Pada bab ini juga disertakan data-data yang akan digunakan sebagai pengujian kasus pada BAB IV.

#### **4. BAB IV. HASIL SIMULASI & ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK**

Bab ini berisi tentang hasil pengujian kestabilan transien melalui simulasi menggunakan *software* ETAP serta analisis yang berkaitan dengan keadaan frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akibat adanya gangguan transien pada kasus-kasus seperti gangguan lepasnya generator, *starting motor*, dan hubung singkat.

#### **5. BAB V. PENUTUP**

Berisi kesimpulan yang diperoleh dari pembuatan Tugas Akhir ini dan saran-saran untuk pengembangan laporan Tugas Akhir selanjutnya.

##### **1.7 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari penelitian Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat antara lain:

1. Mengetahui analisis serta rekomendasi kestabilan transien melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akibat gangguan di PT. Petrokimia Gresik karena adanya sistem integrasi Pabrik I, II, III, unit batu bara dan PLN pada sistem distribusi ring.
2. Mengetahui skema pelepasan beban yang handal ketika terjadi adanya gangguan pada sistem integrasi kelistrikan yang ada di PT. Petrokimia Gresik.





## **BAB II**

### **KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

#### **2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi. Secara umum, baik atau buruknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik terutama ditinjau dari kualitas daya yang diterima oleh konsumen. Kualitas daya yang baik antara lain meliputi kapasitas daya yang memenuhi dan tegangan yang selalu konstan pada tegangan nominal. Tegangan harus selalu dijaga konstan terutama rugi tegangan yang terjadi di ujung saluran. Tegangan yang tidak stabil dapat mengakibatkan kerusakan alat-alat yang peka terhadap perubahan tegangan (khususnya alat-alat elektronik). Tegangan yang terlalu rendah akan mengakibatkan alat-alat listrik tidak dapat beroperasi sebagaimana mestinya. Demikian juga tegangan terlalu tinggi dapat berpotensi merusak alat-alat listrik. Perubahan nilai frekuensi akan sangat dirasakan oleh pemakai listrik yang penggunaannya berkaitan/bergantung pada kestabilan frekuensi. Konsumen kelompok ini biasanya adalah industri-industri yang menggunakan mesin-mesin otomatis dengan menggunakan *setting* waktu/frekuensi seperti peralatan motor. Oleh karena itu, kestabilan frekuensi dan tegangan harus selalu dikontrol untuk menghindari resiko-resiko yang mungkin terjadi sehingga kerusakan hingga kegagalan sistem dapat dihindari.

Pada sistem tenaga listrik, terdapat beberapa komponen utama. Komponen tersebut terdiri atas pembangkitan tenaga listrik, transmisi tenaga listrik, serta distribusi tenaga listrik. Tiap komponen tersebut saling bergantung satu sama lain. Penjelasan tiap komponennya adalah sebagai berikut, berdasarkan referensi [1]:

1. Pembangkit tenaga listrik (pembangkitan): berfungsi membangkitkan energi listrik dengan cara merubah energi mekanik menjadi energi listrik.
2. Sistem transmisi (penyaluran): proses menyalurkan energi listrik dari satu tempat ke tempat lain (dari pembangkit listrik ke gardu induk atau dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya), dengan menggunakan penghantar yang direntangkan antara tiang-tiang (*tower*) melalui isolator-isolator, dengan sistem tegangan tinggi.

3. Sistem distribusi (distribusi): pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke instalasi pemanfaatan (pelanggan).
4. Instalasi milik pelanggan (pemanfaatan): pihak yang memanfaatkan energi listrik.

Fungsi jaringan distribusi adalah menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk distribusi (*distribution substation*) kepada pelanggan listrik dengan mutu pelayanan yang memadai. Salah satu unsur dari mutu pelayanan adalah kontinuitas pelayanan yang tergantung pada topologi dan konstruksi jaringan serta peralatan tegangan menengah. Masalah utama dalam menjalankan fungsi jaringan distribusi tersebut adalah mengatasi gangguan dengan cepat mengingat gangguan yang terbanyak dalam sistem tenaga listrik terdapat dalam jaringan distribusi, khususnya jaringan tegangan menengah 20 KV, berdasarkan referensi [1].

Istilah keandalan jaringan distribusi dapat diartikan sebagai pengamanan jaringan distribusi dalam menghindari atau meminimalisasi gangguan-gangguan yang menyebabkan pemadaman jaringan distribusi. Keandalan merupakan indikator performansi kerja suatu peralatan atau sistem sesuai dengan fungsinya dalam periode waktu dan kondisi operasi tertentu. Penyebab gangguan- gangguan pada jaringan distribusi khususnya jaringan tegangan menengah 20 KV antara lain:

- 1) Gangguan akibat alam (petir, angin, hujan)
- 2) Gangguan peralatan (hubung singkat atau *human error*)

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan disuplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer salah satunya yaitu jaringan distribusi ring, berdasarkan referensi [2].

### **2.1.1 Jaringan Distribusi Ring**

Sistem rangkaian tertutup pada jaringan distribusi merupakan suatu sistem penyaluran melalui dua atau lebih saluran *feeder* yang saling berhubungan membentuk rangkaian berbentuk cincin. Sistem ini



secara ekonomis menguntungkan, karena gangguan pada jaringan terbatas hanya pada saluran yang terganggu saja. Sedangkan pada saluran yang lain masih dapat menyalurkan tenaga listrik dari sumber lain dalam rangkaian yang tidak terganggu. Sehingga kontinuitas pelayanan sumber tenaga listrik dapat terjamin dengan baik. Yang perlu diperhatikan pada sistem ini apabila beban yang dilayani bertambah, maka kapasitas pelayanan untuk sistem rangkaian tertutup ini kondisinya akan semakin memburuk. Tetapi jika digunakan titik sumber (pembangkit tenaga listrik) lebih dari satu di dalam sistem jaringan ini maka sistem ini akan banyak dipakai, dan akan menghasilkan kualitas tegangan lebih baik, serta regulasi tegangannya cenderung kecil, berdasarkan referensi [2].

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu apabila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber, maka jaringan ini merupakan bentuk tertutup atau biasa disebut juga bentuk jaringan distribusi ring. Susunan rangkaian penyulang (*feeder*) membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil, berdasarkan referensi [2].

Secara umum bentuk sistem distribusi ring ini ada 2 macam, yaitu:

1) *Open Loop*

Bila dilengkapi dengan *normally-open switch*, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

2) *Close Loop*

Bila dilengkapi dengan *normally-close switch*, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

## 2.2 Definisi Kestabilan Transien

Dalam keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya mekanis pada *prime mover* dengan daya listrik/beban listrik pada sistem. Dalam keadaan ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya *input* mekanis pada *prime mover* dari generator-generator. Bila daya *input* mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat terjadi perbedaan yang besar antara daya

mekanis pada generator dan daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan dan perlambatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem, berdasarkan referensi [3].

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas.

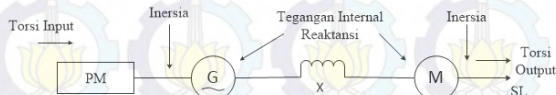
Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

- 1) Stabilitas tetap (*steady state*)
- 2) Stabilitas peralihan (*transient*)
- 3) Stabilitas sub peralihan (*dynamic*)

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban). Stabilitas transien adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan atau satu *swing* pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) belum bekerja. Sedangkan stabilitas dinamis adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas transien) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas transien bila AVR dan governor bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis), berdasarkan referensi [4].

Ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan transien yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Kehilangan sinkronisasi ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar, maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor

bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang, faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi. Berikut pada Gambar 2.1 merupakan gambar sistem kelistrikan secara umum mulai dari daya pembangkitan hingga ke beban listrik, berdasarkan referensi [4].

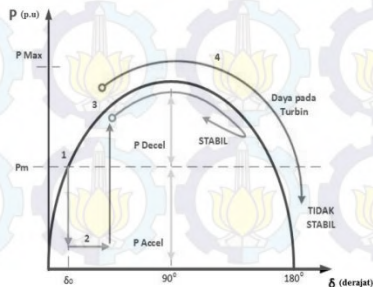


**Gambar 2.1** Garis besar sistem tenaga listrik

Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

- 1) Faktor mekanis:
  - a) Torsi input *prime* beban
  - b) Inersia dari *prime mover* dan generator
  - c) Inersia motor dan sumbu beban
  - d) Torsi input sumbu beban
- 2) Torsi elektrik:
  - a) Tegangan internal dari generator sinkron
  - b) Reaktansi sistem
  - c) Tegangan internal dari motor sinkron

Gangguan besar yang terjadi pada sistem tenaga listrik mempengaruhi kinerja generator sehingga putaran rotor generator dapat mengalami fluktuasi kecepatan. Berikut pada Gambar 2.2 merupakan perilaku generator ketika sistem mengalami gangguan.



**Gambar 2.2** Perilaku generator saat terjadi gangguan



Pada titik kerja awal (sebelum terjadi gangguan), dapat diketahui bahwa timbulnya gangguan seketika mengakibatkan daya *output* generator turun secara drastis. Selisih antara daya *output* listrik tersebut dan daya mekanis turbin mengakibatkan rotor generator mengalami percepatan, sehingga sudut rotor/daya bertambah besar. Ketika gangguan hilang, daya *output* generator pulih kembali pada harga yang sesuai dengan kurva  $p-\delta$  di atas.

Setelah gangguan hilang, daya *output* generator menjadi lebih besar daripada daya mekanis turbin. Hal ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator. Bila terdapat torsi lawan yang cukup setelah gangguan hilang untuk mengimbangi percepatan yang terjadi selama terjadinya gangguan, generator akan stabil setelah ayunan (*swing*) yang pertama dan kembali ke titik kerjanya dalam waktu kira-kira 0,5 detik. Bila kopel lawan tersebut tidak cukup besar, sudut rotor/daya akan terus bertambah besar sampai sinkronisasi dengan sistem hilang, berdasarkan referensi [5].

Pengaruh/penentuan stabilitas ditentukan dari beberapa faktor-faktor pendukung, antara lain, berdasarkan referensi [6]:

- 1) Kapasitas kemampuan alternator, semakin besar daya mampu sistem tersebut maka sistem akan semakin stabil.
- 2) Sifat dan kapasitas beban, pembebanan yang melebihi kapasitas daya pembangkitan akan mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan. Pembebanan melebihi kapasitas dalam jangka waktu yang lama juga berpotensi mengganggu kestabilan yang mampu mengakibatkan kegagalan sistem.
- 3) Gangguan: jenis, lama, dan posisi gangguan pada kejadian gangguan satu fasa ke tanah dan gangguan sementara/temporer mempunyai kondisi kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem yang mengalami gangguan lainnya.

Stabilitas sistem tenaga listrik menentukan keandalan sistem. Semakin tinggi stabilitas suatu sistem, maka kestabilan sistem juga semakin tinggi. Hal ini juga mempengaruhi umur peralatan pada sistem yang digunakan. Pengoperasian pada kestabilan yang baik tentu berdampak pada keekonomisan peralatan yang berarti penggantian peralatan akibat kerusakan dapat dihindari sebelum waktunya.

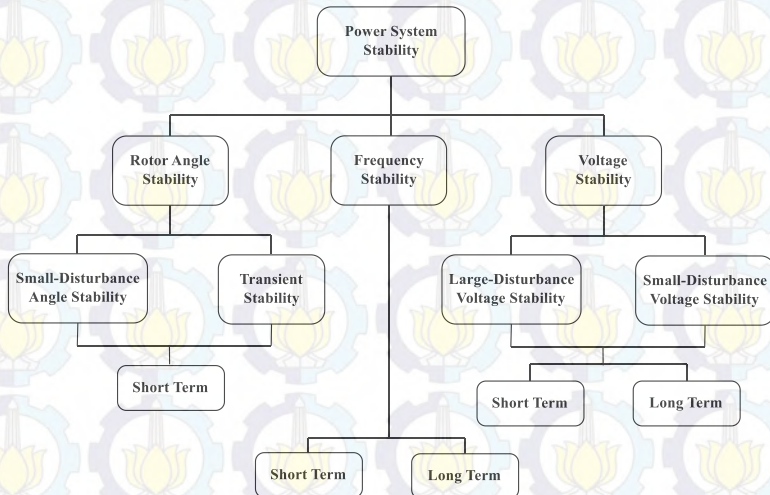


### 2.3 Klasifikasi Kestabilan

Berdasarkan sifat fisik dari fenomena, stabilitas sistem tenaga dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu, berdasarkan referensi [7]:

- 1) Kestabilan Frekuensi
- 2) Kestabilan Tegangan
- 3) Kestabilan Sudut Rotor

Permasalahan kestabilan sebenarnya merupakan suatu permasalahan umum, namun adanya variasi ketidakstabilan sistem mengakibatkan permasalahan kestabilan menjadi lebih kompleks. Oleh karena itu perlu adanya klasifikasi berkaitan dengan penyelesaian sistem sesuai dengan representasi/analisis yang tepat. Pada Gambar 2.3 dijelaskan mengenai klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik berdasarkan gangguan-gangguan yang mungkin terjadi.



**Gambar 2.3** Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik

Analisis stabilitas transien termasuk dalam mengidentifikasi faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan dan merancang metode untuk meningkatkan operasi yang stabil yang mana sangat dipengaruhi oleh klasifikasi stabilitas dalam kategori yang tepat.

Pembagian/klasifikasi kestabilan tersebut didasarkan pada beberapa pertimbangan, antara lain, berdasarkan referensi [7]:

- 1) Parameter yang berpengaruh terhadap kestabilan
- 2) Besar/kecilnya gangguan
- 3) Pertimbangan waktu sebagai parameter kestabilan sistem

### **2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor (*Rotor Angle Stability*)**

Stabilitas sudut rotor mengacu pada kemampuan mesin sinkron yang saling berhubungan/terinterkoneksi untuk tetap berada pada kondisi sinkron setelah mengalami gangguan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik setiap mesin sinkron dalam sistem tersebut. Ketidakstabilan ini dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan ayunan sudut beberapa generator sehingga menyebabkan hilangnya sinkronisasi generator satu dengan generator lain. Berdasarkan karakteristik rotornya, kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua, yaitu, berdasarkan referensi [8]:

#### **2.3.1.1 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Kecil (*Small-Disturbance Angle Stability*)**

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan sinkron ketika sistem mengalami gangguan kecil. Studi stabilitas transien gangguan kecil ini umumnya terjadi pada rentang waktu 10-20 detik setelah adanya gangguan dan tergantung pada operasi awalnya. Pada keadaan ini, daya *output* generator akan berubah-ubah sesuai dengan perubahan besarnya sudut rotor.

#### **2.3.1.2 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Besar (*Large-Disturbance Angle Stability/Transient Stability*)**

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kestabilan berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan sinkron saat mengalami gangguan. Gangguan besar yang dapat terjadi seperti hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya pembangkit dapat mengganggu kerja sistem kelistrikan industri. Respon sudut generator mengalami penyimpangan dan dipengaruhi oleh ketidaklinieran hubungan sudut daya sehingga sistem mengalami "*loss of synchronization*" yang mengakibatkan ketidakstabilan ayunan pertama. Studi stabilitas transien pada keadaan ini terjadi dalam rentang

waktu yang singkat yaitu antara 3–5 detik setelah adanya gangguan secara tiba-tiba. Pada sistem kelistrikan yang lebih luas, rentang waktu dapat berkisar antara 10–20 detik setelah gangguan. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil dan kestabilan transien tergolong fenomena kestabilan jangka pendek (*short term*).

### **2.3.2 Kestabilan Frekuensi (*Frequency Stability*)**

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan nilai frekuensi nominal agar tetap stabil mengikuti perubahan sistem yang berubah secara tiba-tiba akibat ketidakseimbangan pasokan daya pembangkit dengan daya yang diserap beban. Perputaran turbin sangat erat kaitannya dengan frekuensi sistem tenaga listrik. Apabila turbin berputar melebihi putaran nominalnya, maka torsi putar yang dihasilkan juga semakin besar sehingga frekuensi akan naik dan mampu menimbulkan potensi kerusakan pada pembangkit hingga ke jaringan-jaringan transmisi dan distribusi khususnya industri, berdasarkan referensi [8].

### **2.3.3 Kestabilan Tegangan (*Voltage Stability*)**

Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan pada kondisi stabil pada semua bus dalam sistem tenaga listrik setelah terjadi gangguan dari kondisi operasi awal yang diberikan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara permintaan beban dan suplai beban dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan frekuensi dapat mengakibatkan terjadinya penurunan atau naiknya tegangan dari beberapa bus. Ketidakstabilan tegangan dapat dipengaruhi karena hilangnya beban pada sistem, hubung singkat saluran transmisi, dan pemadaman secara tiba-tiba. Penurunan secara bertahap dalam tegangan bus juga dapat dikaitkan dengan ketidakstabilan sudut rotor.

Faktor utama yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan tegangan adalah adanya *drop* tegangan yang terjadi pada aliran daya aktif dan reaktif melalui reaktansi induktif jaringan transmisi. Hal ini dapat membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mengalirkan daya dan mengurangi besar tegangan. Penyaluran daya dibatasi ketika generator menyentuh batas beban lebih arus jangka. Stabilitas tegangan dapat terancam ketika gangguan meningkatkan daya reaktif permintaan listrik melebihi kapasitas sumber daya reaktif yang tersedia. Kestabilan



tegangan dibagi menjadi dua kategori untuk memudahkan identifikasi permasalahan, yaitu, berdasarkan referensi [8]:

#### **2.3.3.1 Kestabilan Tegangan Gangguan Kecil (*Small-Disturbance Voltage Stability*)**

Kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada kondisi stabil akibat gangguan kecil seperti perubahan beban yang tidak menentu. Analisis kestabilan tegangan gangguan kecil menggunakan teknik linear dapat memberikan informasi kestabilan tegangan yang terkait berdasarkan kondisi yang ada sehingga penyebab dan lokasi potensi gangguan dapat ditentukan. Gangguan tegangan kecil dipengaruhi oleh karakteristik beban hingga pengontrolan secara terus-menerus pada sistem tenaga. Konsep ini berguna dalam menentukan bagaimana tegangan merespon perubahan beban-beban kecil.

#### **2.3.3.2 Kestabilan Tegangan Gangguan Besar (*Large-Disturbance Voltage Stability*)**

Kemampuan untuk mempertahankan tegangan stabil yang diakibatkan adanya gangguan besar seperti kesalahan sistem, lepasnya generator, dan hubung singkat. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik sistem dan beban, dan interaksi keduanya. Evaluasi stabilitas biasanya membutuhkan pengujian respon tidak linier (kinerja dinamis) dari sistem tenaga listrik selama periode waktu yang cukup untuk mengamati interaksi peralatan seperti *tap changer* transformator dan arus medan pada generator.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kestabilan merupakan suatu permasalahan, namun untuk mengidentifikasi lebih rinci mengenai permasalahan yang terjadi dibutuhkan klasifikasi. Klasifikasi kestabilan tegangan berdasarkan waktunya dapat dibagi menjadi 2, yaitu, berdasarkan referensi [8]:

#### **2.3.3.2.1 Kestabilan Tegangan Jangka Pendek (*Short Term Voltage Stability*)**

Gangguan kestabilan jangka pendek dapat mengakibatkan adanya kedip tegangan (*voltage sags*) hingga kenaikan tegangan (*swells*) pada sistem tenaga listrik, berdasarkan referensi [8].

##### **1) Kedip Tegangan (*Voltage Sag*)**

Kedip tegangan menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai



variasi tegangan rms dengan rentang besar tegangan antara 90% sampai 10% dari tegangan nominal dan berlangsung selama 0,5 *cycle* sampai 1 menit. Kedip tegangan dapat diakibatkan oleh kesalahan sistem awal, namun kasus ini juga dapat disebabkan oleh *switching* beban kapasitas besar atau *starting motor* dengan daya besar seperti motor induksi yang membutuhkan arus *start* sekitar 6–10 kali arus nominal. Kedip tegangan yang berkelanjutan tentu dapat mengakibatkan gangguan proses pada peralatan sistem tenaga sehingga permasalahan ini harus dapat diatasi dengan baik untuk menunjang keandalan sistem tenaga.

## 2) Kenaikan Tegangan (*Voltage Swell*)

Kenaikan tegangan menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai peningkatan tegangan rms atau arus pada frekuensi daya untuk jangka waktu 0,5 *cycle* selama 1 menit. Sama seperti kedip tegangan yang mana dapat disebabkan karena adanya kesalahan sistem awal, namun kasus ini lebih jarang ditemukan pada sistem tenaga listrik. Kenaikan tegangan ini dapat terjadi akibat kegagalan saluran satu fasa ke tanah sehingga sistem mengalami tegangan lebih sementara pada fase yang gagal tersebut. Penyebab lainnya adalah adanya *switching* beban yang cukup besar atau *switching* kapasitor *bank*. Dampak yang berpotensi timbul akibat peningkatan tegangan secara umum adalah terjadinya kegagalan komponen.

### 2.3.3.2.2 Kestabilan Tegangan Jangka Lama (*Long Term Voltage Stability*)

Gangguan kestabilan jangka lama menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai cakupan penyimpangan/deviasi rms pada sistem tenaga selama lebih dari 1 menit. Kasus ini dapat mengakibatkan adanya tegangan lebih (*over voltage*) dan tegangan kurang (*under voltage*) pada sistem tenaga listrik tergantung pada penyebab terjadinya, berdasarkan referensi [8]:

### 1) Tegangan Lebih (*Over Voltage*)

Merupakan peningkatan nilai tegangan rms sebesar lebih dari atau sama dengan 110% (110% - 120%) selama lebih dari 1 menit. Tegangan lebih umumnya dihasilkan akibat adanya *switching* peralatan seperti pelepasan beban dengan kapasitas daya yang besar, *switching* kapasitor *bank*, dan sebagainya. Faktor lain penyebab tegangan lebih yaitu tegangan sistem yang buruk, pengaturan tegangan yang buruk seperti adanya kemungkinan kesalahan pengaturan *tap* transformator sehingga mengakibatkan kenaikan tegangan.

Akibat dari tegangan lebih tentu berdampak pada peralatan sistem tenaga listrik. Jika pada perangkat elektronik, maka kondisi ini dapat menyebabkan perangkat rusak. Berbeda dengan peralatan sistem tenaga seperti transformator, kabel, bus, *switchgear*, CT, dan PT umumnya tidak mengalami kegagalan seketika. Namun, keadaan tegangan lebih yang berkelanjutan berpotensi mengurangi umur peralatan tersebut. Bahkan apabila terdapat relay pada sebuah sistem, maka operasi yang tidak sesuai rencana dapat saja terjadi.

### 2) Tegangan Kurang (*Under Voltage*)

Merupakan penurunan nilai tegangan rms sebesar kurang dari atau sama dengan 90% (90% - 80%) selama lebih dari 1 menit. Penyebab *under voltage* merupakan kebalikan dari adanya *over voltage* seperti penambahan beban dengan daya yang besar, penyalan *switching* kapasitor *bank*, dan sebagainya. Berkurangnya besar tegangan juga memiliki dampak terhadap kinerja sistem tenaga listrik. Keadaan ini dapat berpengaruh pada peralatan seperti kontroler motor yang mana secara umum tegangan *drop* yang diizinkan adalah sebesar 70 – 80% dari tegangan nominal. Dampak nyata akibat keadaan ini ialah peningkatan lonjakan arus pada motor yang mengakibatkan tingginya rugi panas, perubahan kecepatan motor induksi, dan sebagainya.

## 2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan (*Rotor Dynamics and The Swing Equation*)

Persamaan yang mengatur gerakan (putaran) rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil kali dari momen kelambaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Untuk generator sinkron, persamaan ayunan dapat ditulis sebagai berikut, berdasarkan referensi [9]:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

dimana:

$J$  = Momen inersia/kelembaman total dari massa rotor ( $\text{Kg.m}^2$ )

$\theta_m$  = Sudut pergeseran (*angular displacement*) rotor terhadap suatu sumbu yang diam (rad)

$t$  = Waktu (dalam detik)

$T_m$  = Momen putar poros yang disuplai dari *prime mover* dengan mempertimbangkan reduksi torsi akibat rugi putaran (Nm)

$T_e$  = Momen putar elektromagnetik (Nm)

$T_a$  = Momen putar percepatan bersih (Nm)

Momen putar mekanis  $T_m$  dan momen putar elektrik  $T_e$  dianggap positif untuk generator serempak. Ini berarti bahwa  $T_m$  adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran  $\theta_m$  yang positif.

Untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap,  $T_m$  dan  $T_e$  adalah sama sedangkan momen putar  $T_a$  sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan serempak dengan mesin lainnya yang bekerja pada kecepatan serempak dalam sistem daya tersebut. Penggerak mulanya mungkin berupa suatu turbin air atau turbin uap dan untuk masing-masing turbin sudah ada model dengan bermacam-macam tingkat kesulitan untuk melukiskan pengaruh pada  $T_m$ .

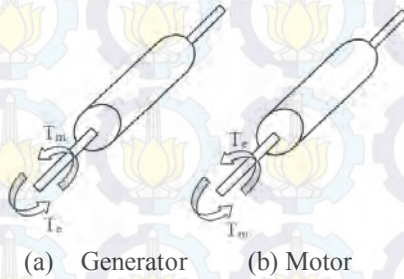
Jika generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron  $\omega_{sm}$  maka:



$$T_m = T_e \quad (2.2)$$

Jika terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan ( $T_m > T_e$ ) atau perlambatan ( $T_m < T_e$ ) seperti yang terdapat pada Gambar 2.4 dimana:

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$



**Gambar 2.4** Representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektris (a) Generator (b) Motor

Pada persamaan (2.1) karena  $\theta_m$  diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.4)$$

Dengan  $\theta_m$  adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.4) terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.5)$$

Dimana percepatan rotornya adalah

$$\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (2.6)$$



Substitusi persamaan (2.6) ke persamaan (2.1), sehingga:

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.7)$$

Kemudian dengan mengalikan persamaan (2.7) dengan  $\omega_m$  maka didapat:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.8)$$

Jika kecepatan putar dikali torsi adalah sama dengan daya, maka persamaan (2.8) dapat ditulis dengan persamaan daya sebagai berikut:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

Dimana  $J \omega_m$  adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor yang dinyatakan dengan M. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut:

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2 \quad (2.10)$$

atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) lebih sesuai untuk menuliskan persamaan ayunan dengan parameter sudut daya listrik  $\delta$ . Jika p adalah jumlah kutub generator sinkron, maka sudut daya listrik  $\delta$  dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik  $\delta_m$  adalah

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad \text{dan} \quad \omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.12)$$

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya listrik adalah

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

Bila nilai  $M$  pada persamaan (2.11) disubstitusikan kedalam persamaan (2.13) dan dibagi dengan daya dasar  $S_B$ , akan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{2}{p} \times \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.14)$$

Terdapat suatu besaran yang dikenal sebagai konstanta  $H$ . Konstanta  $H$  didefinisikan sebagai energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi rating mesin (MVA) yang dituliskan seperti persamaan berikut:

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.15)$$

Substitusi persamaan (2.15) ke persamaan (2.14) maka didapatkan:

$$\frac{2}{p} \times \frac{2H}{\omega_{sm}} \times \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m (p.u) - P_e (p.u) \quad (2.16)$$

dimana:

$P_m (p.u)$  = daya mekanik dalam satuan p.u

$P_e (p.u)$  = daya listrik dalam satuan p.u

Kecepatan putar listrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik dengan  $\omega_{sm} = \frac{2}{p} \omega_s$  sehingga persamaan (2.16) menjadi:

$$\frac{2H}{\omega_s} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m (p.u) - P_e (p.u) \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) sering diekspresikan dalam bentuk frekuensi  $f_0$  dan subskrip per unit dihilangkan sehingga daya dinyatakan dalam satuan per unit dari persamaan (2.17) adalah

$$\frac{H}{\pi f_0} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Dengan  $\delta$  dalam radian. Jika  $\delta$  dinyatakan dalam derajat, maka persamaan ayunan menjadi:

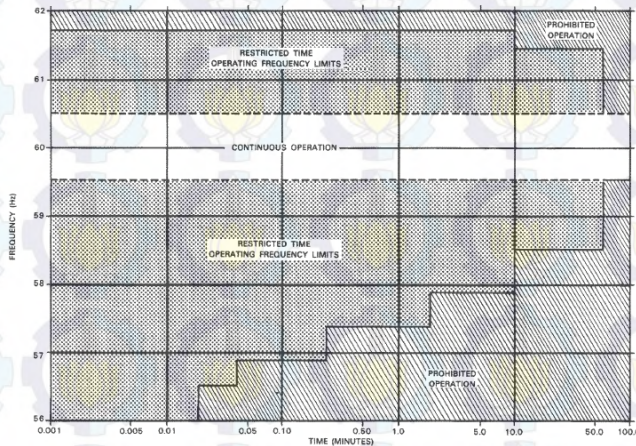
$$\frac{H}{180f_0} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.18)$$

## 2.5 Standar Kestabilan Transien

Dalam penerapannya, kestabilan transien disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak/*software* untuk mengetahui keadaan sistem sesaat setelah terjadi gangguan. Aturan mengenai kestabilan transien menggunakan standar internasional sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk analisis sistem tenaga listrik.

### 2.5.1 Standar Kemampuan Frekuensi Abnormal Turbin

Setiap produsen mampu memberikan karakteristik operasi normal terhadap peralatan yang dibuatnya. Pada turbin uap misalnya, produsen umumnya memiliki data berupa batas kemampuan turbin ketika beroperasi. Batasan ini digunakan sebagai antisipasi perlindungan peralatan sehingga resiko kerusakan dapat dihindari. Gambar 2.5 merupakan standar kemampuan frekuensi abnormal pada turbin uap, berdasarkan referensi [8].



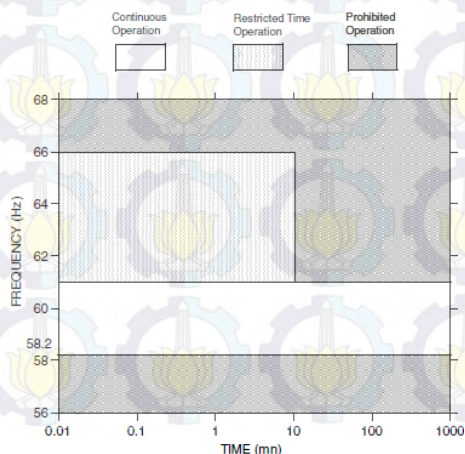
**Gambar 2.5** Standar batas operasi turbin uap (*Over/Under Frequency*)

Pada gambar tersebut, batas frekuensi antara 59,5 Hz – 60,5 Hz merupakan batas normal operasi turbin uap. Sedangkan batas frekuensi diatas 60,5 Hz dan dibawah 59,5 Hz adalah batas larangan turbin uap



beroperasi. Batas frekuensi yang telah disebutkan sebelumnya merupakan batas frekuensi standar 60 Hz. Jika dikonversi menjadi standar 50 Hz maka 59,5 Hz akan menjadi 49,58 Hz atau sekitar 99,16%. Sedangkan 60 Hz menjadi 50,42 Hz atau sekitar 100,83 Hz. Berdasarkan standar, kejadian *under frequency* dapat mengakibatkan berkurangnya umur sebuah peralatan. *Under frequency* yang pertama pada turbin uap mampu menyebabkan kecepatan putar turbin melemah dan mengurangi siklus kegagalan pada waktu berikutnya. Jika sebuah unit mampu beroperasi pada frekuensi tertentu selama 1 menit, maka unit tersebut diperbolehkan tetap beroperasi selama 9 menit berikutnya pada frekuensi yang sama hingga melebihi batas umur *blades*.

Standar operasi batas frekuensi dapat berbeda sesuai dengan karakteristik pembangkit yang digunakan. Turbin pembakaran/gas turbin berbeda dengan turbin uap terutama pada media yang digunakan untuk menggerakkan turbin, yaitu adanya proses kompresi udara dan pencampuran dengan bahan bakar sehingga menghasilkan gas buang panas. Gas ini disalurkan menuju turbin yang telah terpasang pada poros. Poros inilah yang berputar untuk menggerakkan generator. Penerapan batas frekuensi bawah memiliki kesamaan dengan penerapan batas frekuensi bawah pada turbin uap. Namun, terdapat perbedaan pada desain turbin serta adanya pembakaran yang mengakibatkan persyaratan perlindungan juga berbeda. Pada Gambar 2.6 berikut ini merupakan standar batas operasi pada gas turbin.

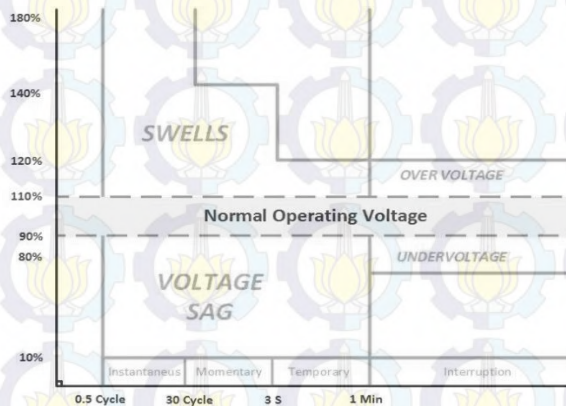


**Gambar 2.6** Standar batas operasi gas turbin (*Over/Under Frequency*)



### 2.5.2 Standar Batas Operasi Tegangan

Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai penyedia listrik di Indonesia, memiliki standar mengenai batas tegangan operasi yang harus dipenuhi untuk penggunaan di industri. Secara umum proses penyaluran daya sistem tenaga listrik dilakukan melalui jarak yang cukup jauh sehingga potensi adanya *drop* tegangan dan rugi-rugi transmisi tidak dapat diabaikan. Pada Gambar 2.7 berikut ini merupakan batas operasi normal tegangan pada kondisi transien hingga *steady state*.



**Gambar 2.7** Standar batas operasi tegangan kestabilan transien

Standar tegangan nominal dalam kondisi normal yang diperbolehkan oleh PLN yaitu:

- 500 kV + 5%, -5%
- 150 kV + 5%, -10%
- 70 kV + 5%, -10%
- 20 kV + 5%, -10%

### 2.5.3 Standar Pelepasan Beban (*Load Shedding*)

Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, terdapat 2 skema pelepasan beban ketika terjadi gangguan antara lain adalah pelepasan beban 3 langkah dan pelepasan beban 6 langkah. Tabel 2.1 dan 2.2 berikut adalah pelepasan beban 3 langkah dan pelepasan beban 6 langkah (60 Hz) dan Tabel. 2.3 dan 2.4 berikut adalah pelepasan beban 3 langkah dan pelepasan beban 6 langkah (50 Hz), berdasarkan referensi [8].

**Tabel 2.1** Standar pelepasan beban 3 langkah (60Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	59,3	10	6
2	58,9	15	6
3	58,5	<i>As required to arrest decline before 58,2 Hz</i>	

**Tabel 2.2** Standar pelepasan beban 6 langkah (60Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	59,5	10	6
2	59,2	10	6
3	58,8	5	6
4	58,8	5	14
5	58,4	5	14
6	58,4	5	21

**Tabel 2.3** Standar pelepasan beban 3 langkah (50Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent %</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	49,42	98,84%	10	6
2	49,08	98,16%	15	6
3	48,75	97,5%	<i>As required to arrest decline before 48,5 Hz</i>	

**Tabel 2.4** Standar pelepasan beban 6 langkah (50Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent %</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	49,58	99,16%	10	6
2	49,33	98,66%	10	6
3	49	98%	5	6
4	49	98%	5	14
5	48,67	97,34%	5	14
6	48,67	97,34%	5	21





## BAB III

### SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

#### 3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik

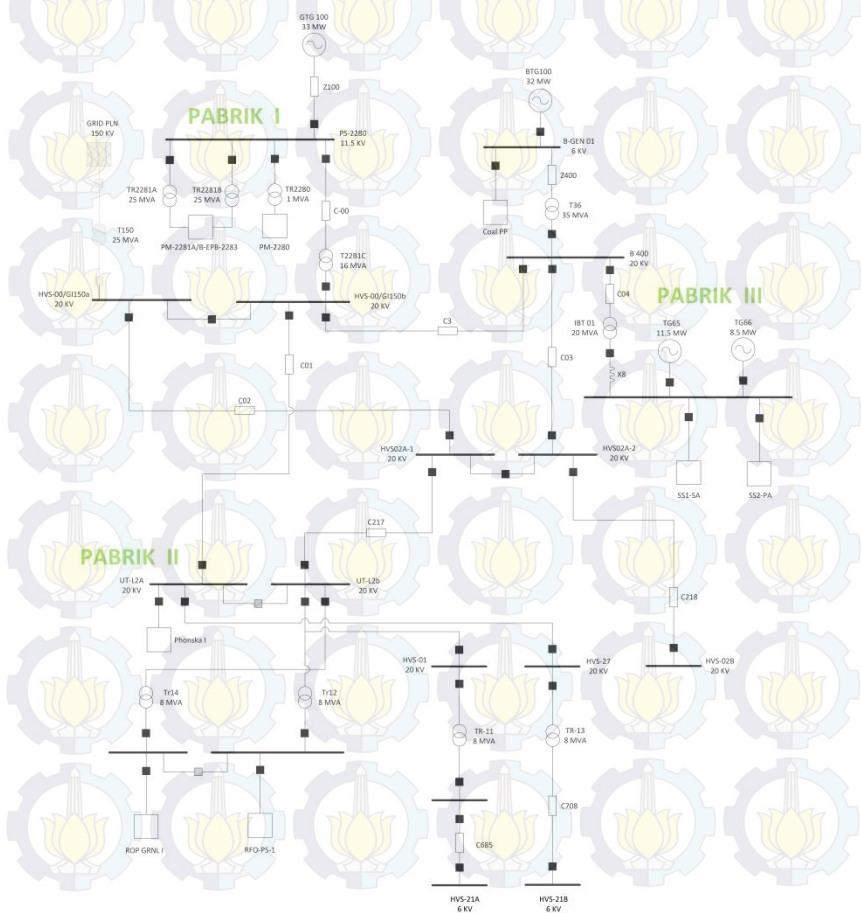
PT. Petrokimia Gresik merupakan salah satu pabrik pupuk terbesar di Indonesia. Untuk menunjang kegiatan operasional di PT. Petrokimia Gresik, maka diperlukan pembangkit listrik yang cukup untuk melayani kebutuhan daya beban selama proses produksi. Oleh karena itu, PT. Petrokimia Gresik mengoperasikan *Gas Turbine Generator (GTG Plant-I)* dengan daya sebesar 1x33 MW, *Steam Turbine Generator (STG Plant-III)* 1x11,5 MW dan 1x8,5 MW serta Daya dari PLN. Pada tahun 2010, PT. Petrokimia Gresik berupaya meningkatkan keandalan dengan menambahkan satu unit pembangkit *Steam Turbine Generator (STG UBB Plant)* sebesar 1x32 MW untuk meningkatkan keandalan dan *spinning reserve*. Unit-unit pembangkit tersebut akan diintegrasikan langsung ke sistem tegangan 20 KV.

PT. Petrokimia Gresik memiliki sistem kelistrikan yang di-suplai oleh beberapa Generator dan UBB (Utilitas Batu Bara). Selain itu, beberapa generator yang dioperasikan juga akan diintegrasikan dengan *grid* PLN sebagai cadangan. Namun, pada Tugas Akhir ini diasumsikan bahwa PT. Petrokimia beroperasi dalam keadaan suplai dari PLN *OFF*. Berikut pada Tabel 3.1 adalah data daya generator yang digunakan PT. Petrokimia Gresik:

**Tabel 3.1** Data spesifikasi generator di PT. Petrokimia Gresik

No.	Spesifikasi	Generator ID				
		GTG 100	BTG100	TG 65	TG 66	DE – 2283
1.	Rating Daya (MW)	33	32	11,5	8,5	0,9
2.	Tegangan (kV)	11,5	6	6	6	0,38
3.	Kutub	4	2	4	4	4
4.	Faktor Daya	80%	80%	80%	80%	85%
5.	Tipe <i>Exciter</i>	DC1	ST1	ST1	ST1	-
6.	Tipe Governor	GT	ST	2301	2301	-
7.	Mode	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>

Sistem integrasi kelistrikan sebesar 20 KV pada PT. Petrokimia bertujuan untuk perencanaan pengembangan lokasi serta pabrik menjadi lebih luas sehingga permintaan produksi dapat terpenuhi dengan baik serta mampu memberi keuntungan dalam segi ekonomi. Pada Tugas Akhir ini, sistem integrasi 20 KV akan dihubungkan membentuk jaringan sistem distribusi ring dengan rating tegangan 20 KV. Berikut pada Gambar 3.1 merupakan sistem kelistrikan yang ada di PT. Petrokimia Gresik.



**Gambar 3.1** Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

Penyaluran daya listrik pada sistem distribusi di PT. Petrokimia menggunakan beberapa trafo *step up* maupun *step down*. Berikut pada Tabel 3.2 adalah data spesifikasi generator di PT. Petrokimia Gresik.

**Tabel 3.2** Data spesifikasi trafo di PT. Petrokimia Gresik

No.	Trafo ID	MVA	kV	%Z	X/R	Hubungan
1.	TR2281A	25	11,5/6	10	23,7	Delta/Wye
2.	TR2281B	25	11,5/6	10	23,7	Delta/Wye
3.	TR2280	1	11,5/0.38	10	5,79	Delta/Wye
4.	T2281C	16	11,5/20	10	18,6	Delta/Wye
5.	T36	35	6/20	12,5	27,3	Delta/Wye
6.	IBT 01	20	20/6	10,5	18,6	Wye/Delta
7.	Tr14	8	20/6	8,35	14,23	Delta/Wye
8.	Tr12	8	20/6	10	14,23	Delta/Wye
9.	TR-11	8	20/6	8,35	14,23	Delta/Wye
10.	TR-13	8	20/6	10	14,23	Delta/Wye

Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik menggunakan sistem interkoneksi dan sistem distribusi ring dengan menggunakan 4 generator utama dan 1 generator cadangan (*emergency*). Seluruh generator yang beroperasi mampu menghasilkan daya sebesar 53,9 MW pada beban yang ada di PT. Petrokimia Gresik dengan rincian generator GTG 100 mampu menghasilkan daya sebesar 20,7 MW, generator BTG100 menghasilkan daya sebesar 16,2 MW, generator TG65 menghasilkan daya sebesar 10 MW, dan generator TG66 menghasilkan daya sebesar 7 MW dengan rating tegangan yang berbeda-beda.

Generator GTG 100 beroperasi pada tegangan 11,5 kV di bus PS-2280. Untuk mengubah rating tegangan menjadi 20 kV, maka bus dihubungkan dengan trafo *step up* dengan kapasitas trafo 16 MVA yang memiliki ID T2281C dan terhubung pada bus HVS-00/GI150b. Generator BTG100 terhubung dengan bus B-GEN 01 dengan rating tegangan 6 kV. Bus tersebut kemudian dihubungkan dengan trafo T36 untuk dinaikkan tegangannya menggunakan trafo *step up* menjadi 20 kV yang terhubung pada bus B 400.

Sistem kelistrikan hubungan ring pada PT. Petrokimia terhubung pada bus HVS-00/GI150a, HVS-00/GI150b, B 400, HVS02A-2, HVS02A-1. Sistem tersebut terhubung pada bus yang sama yaitu dengan



rating tegangan 20 kV. Pemilihan sistem distribusi secara interkoneksi dan ring bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem. Pada produksi pupuk dan non-pupuk, PT. Petrokimia Gresik mengoperasikan Pabrik I yang mana pada Pabrik tersebut diproduksi bahan-bahan utama serta bahan-bahan pendukung produksi di Pabrik II serta Pabrik III seperti Amoniak ( $\text{NH}_3$ ),  $\text{CO}_2$  cair,  $\text{CO}_2$  padat, gas nitrogen, nitrogen cair, dan gas oksigen, oksigen cair. Oleh karena itu, demi keberlangsungan produksi yang baik maka unit produksi Pabrik I harus selalu dalam kondisi aktif / ON.

### 3.2 Motor Induksi MC-1301 (4000 kW) di PT. Petrokimia Gresik

Proses produksi pupuk maupun non-pupuk di Pabrik III, banyak digunakan motor – motor listrik sebagai alat produksinya. Salah satu motor tegangan menengah yang digunakan yaitu motor dengan *equipment id* MC-1301 (4000 kW). Di Pabrik III, MC-1301 merupakan *air blower* yang berfungsi untuk pembakaran (pemanasan) sulfur di tabung pembakaran. Sebelumnya, tabung pembakaran terlebih dahulu akan dipanaskan menggunakan bahan bakar solar hingga mencapai keadaan panas sekitar  $1000^0\text{ C}$ . Setelah itu sulfur akan dipompa menuju tabung dan disemprot menggunakan udara bertekanan oleh MC-1031 sehingga sulfur menjadi butiran-butiran cairan. Butiran cairan tersebut akan mengalami reaksi dengan suhu tinggi tabung hingga akhirnya menjadi gas  $\text{SO}_2$ . Berikut pada Tabel 3.3 merupakan motor-motor tegangan menengah (6 kV) yang ada di Pabrik III, PT. Petrokimia Gresik.

**Tabel 3.3** Data motor tegangan menengah (6 kV) di Pabrik III, PT. Petrokimia Gresik

No.	Motor ID	Power Rating (kW)	Voltage Rating (kV)	Apparent Power (kVA)	RPM	Poles
1.	MC-1301	4000	6	4510	1500	4
2.	MC1302	1000	6	1131	1500	4
3.	MP1101A	275	6	312	1500	4
4.	MP1302	170	6	196	1500	4
5.	MC2323	300	6	342	1500	4
6.	MC2341	160	6	193	1500	4



**Lanjutan Tabel 3.3**

<b>No.</b>	<b>Motor ID</b>	<b>Power Rating (kW)</b>	<b>Voltage Rating (kV)</b>	<b>Apparent Power (kVA)</b>	<b>RPM</b>	<b>Poles</b>
7.	MM2302A	400	6	453	1500	4
8.	MP2601A	150	6	244	1500	4
9.	MP2601C	150	6	244	1500	4
10.	MP2602A	150	6	244	1500	4
11.	MP2602C	150	6	244	1500	4
12.	MQ2204	310	6	351	1500	4
13.	MQ7131-1	220	6	358	1500	4
14.	MC4202	400	6	437	1500	4
15.	MC4203	800	6	874	1500	4
16.	MC5101	200	6	219	1500	4
17.	MC5302A	210	6	230	1500	4
18.	MC5302B	210	6	230	1500	4
19.	MC5603	230	6	251	1500	4
20.	MP6521A	480	6	525	1500	4
21.	MP6521B	480	6	525	1500	4
22.	MP6531A	480	6	525	1500	4
23.	MP6531B	480	6	525	1500	4
24.	MP6201	160	6	175	1500	4
25.	MP6202A	170	6	186	1500	4
26.	M6202B	170	6	186	1500	4



## **BAB IV**

### **SIMULASI & ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK**

#### **4.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik**

*Single Line Diagram* PT. Petrokimia Gresik dimodelkan melalui *software* ETAP 12.6 dengan menggunakan data-data *existing* yang digunakan di PT. Petrokimia Gresik. Kemudian, simulasi akan dilakukan berkaitan dengan analisis kestabilan sistem ketika mengalami gangguan-gangguan besar seperti generator lepas (*generator outage*), *starting motor*, dan gangguan hubung singkat (*short circuit*).

Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik secara umum menggunakan sistem interkoneksi. Sistem ini digunakan untuk meningkatkan keandalan sistem ketika sistem mengalami gangguan. Keunggulan dari sistem interkoneksi ini adalah beberapa pusat pembangkit dapat menyalurkan daya ke beban sehingga memungkinkan beban mendapat suplai lebih dari 1 generator. Pada Tugas Akhir ini, sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dikembangkan dengan menggunakan sistem distribusi ring sehingga diharapkan keandalan sistem semakin meningkat ketika sistem mengalami gangguan besar secara tiba-tiba.

PT. Petrokimia Gresik memiliki beberapa bus utama yang akan diintegrasikan ke sistem interkoneksi dan ring dengan rating 20 kV. Bus tersebut antara lain adalah bus dengan ID HVS-00/GI150a, HVS-00/GI150b, B 400, HVS02A-2, dan HVS02A-1. Untuk menyalurkan ke beban, digunakan trafo *step down* sehingga tegangan turun menjadi 6 kV dan 0,38 kV. Tegangan tersebut kemudian digunakan untuk motor tegangan menengah, motor tegangan rendah, serta beban lampu (*lump load*), dan sebagainya.

#### **4.2 Perencanaan Studi Kasus PT. Petrokimia Gresik**

Pengujian sistem terhadap gangguan berfungsi untuk mengetahui respon sistem terhadap gangguan-gangguan yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis sistem dengan cara memberikan gangguan pada sistem kelistrikan. Gangguan-gangguan yang akan dilakukan antara lain adalah gangguan generator lepas, *starting motor*, dan hubung singkat.

Studi kasus yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini secara umum adalah sebagai berikut:

### 1. Generator Lepas/*Generator Outage*

Pada kasus generator lepas, pada sistem PT. Petrokimia diasumsikan terdapat 1 hingga 2 generator lepas dari sistem kelistrikan ketika sistem sedang berjalan dengan asumsi bahwa pembangkit PLN *OFF*. Setelah itu respon transien sistem akan dipantau untuk mengetahui apakah sistem berjalan sesuai dengan standar yang telah ada. Respon sistem yang akan dipantau antara lain adalah respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sesaat setelah sistem mengalami gangguan.

### 2. *Starting Motor*

Pada kasus ini dilakukan *starting motor* ketika motor berada dalam kondisi *OFF* dengan asumsi 1 motor beroperasi sesaat setelah sistem berjalan. Motor yang di-*start* adalah motor induksi yang memiliki daya paling besar pada sistem yaitu motor dengan ID MC-1301 (4000 kW). Motor induksi kemudian akan dioperasikan sesaat setelah sistem berjalan yaitu 1 detik setelah sistem mulai beroperasi. Setelah itu akan dilihat respon transien sistem ketika motor *start* diantaranya yaitu respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor.

### 3. *Hubung Singkat/Short Circuit*

Pada kasus *hubung singkat*, diasumsikan salah satu bus mengalami gangguan *hubung singkat* tiga fasa. Gangguan *hubung singkat* akan mempengaruhi kestabilan sistem secara umum. Oleh karena itu, pada kasus ini juga dipantau respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sesaat setelah sistem mengalami gangguan *hubung singkat*. Salah satu langkah untuk melindungi sistem sehingga sistem masih dapat bertahan pada standar kestabilannya yaitu dengan menggunakan metode pelepasan beban/*load shedding* yang mengacu pada standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

Berikut ini pada Tabel 4.1 merupakan studi kasus yang akan dilakukan pada *plant* PT. Petrokimia Gresik. Pada Tabel 4.1 juga dijelaskan mengenai keterangan ketika gangguan-gangguan sistem terjadi antara lain keterangan ID peralatan yang mengalami gangguan serta respon *circuit breaker* (CB) ketika sistem mengalami gangguan.



**Tabel 4.1** Studi kasus sistem pada PT. Petrokimia Gresik

No.	Studi Kasus	Keterangan
1.	1Gen.OFF	Generator TG65 lepas dari sistem.
2.	1Gen.OFF + Load shedding (LS1)	Generator TG65 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan pelepasan beban 1.
3.	2Gen.OFF	Generator TG65 & TG66 lepas dari sistem.
4.	2Gen.OFF + Load shedding 1 (LS1)	Generator TG65 & TG66 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan pelepasan beban (1 langkah).
5.	2Gen.OFF + Load shedding 2 (LS2)	Generator TG65 & TG66 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan pelepasan beban (2 langkah).
6.	1 Motor Start (MS1)	Motor ID MC-1301 (4000 kW) pada bus SS#1-SA start saat 1 detik setelah sistem berjalan.
7.	Hubung Singkat 1 / Short Circuit 1 (SC1)	Gangguan hubung singkat 1 pada bus HVS 65 (6 kV) kemudian dilanjutkan dengan CB CB 01-HVS-02 2 open 0,3 detik setelah terjadi gangguan.
8.	Hubung Singkat 2 / Short Circuit 2 (SC2)	Gangguan hubung singkat 2 pada bus HVS-27 (20 kV) kemudian dilanjutkan dengan CB 02CB33 open 0,3 detik setelah terjadi gangguan.

Berdasarkan Tabel 4.1 yang mana telah dijelaskan secara rinci mengenai kasus gangguan yang akan dilakukan, diperlukan indikator kestabilan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, pada kasus generator lepas dan hubung singkat, bus referensi yang digunakan sebagai indikator kestabilan sistem yaitu bus ID B 400 yang mewakili bus dengan rating tegangan 20 kV, bus PS-2280 yang mewakili rating tegangan 11,5 kV, dan bus HVS 65 yang mewakili rating tegangan 6

kV. Sedangkan, pada kasus *starting motor*, bus SS#1-SA (6 kV) digunakan sebagai bus referensi karena bus tersebut terhubung langsung dengan beban yang akan dijalankan. Selain itu, respon akibat *starting motor* akan dipantau juga pada bus utama seperti bus B 400 dan HVS 65. Pada studi kasus hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik, respon frekuensi dan tegangan yang akan diamati adalah bus yang terletak dekat dengan bus yang mengalami gangguan.

Langkah-langkah untuk mencapai kestabilan bergantung pada gangguan yang terjadi dengan memperhatikan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada bus dan generator yang digunakan sebagai referensi kestabilan sistem. Langkah-langkah tersebut antara lain adalah:

1. Mengamati respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem akibat terjadi gangguan besar secara tiba-tiba.
2. Menganalisis respon tersebut apakah sesuai standar yang diizinkan serta melihat apakah sistem kembali stabil setelah terjadi gangguan.
3. Apabila sistem yang mengalami gangguan mengakibatkan kondisi sistem menjadi tidak stabil (berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor) maka dilakukan pelepasan beban menggunakan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

#### **4.3 Simulasi Kestabilan Transien**

Respon kestabilan suatu sistem dapat dimodelkan menggunakan *software* ETAP sehingga gangguan-gangguan yang mungkin terjadi di lapangan juga dapat dilakukan pemodelan sehingga pengujian kestabilan lebih mudah diterapkan. Simulasi kestabilan transien pada PT. Petrokimia Gresik dilakukan dengan membuat studi kasus antara lain lepasnya generator, *starting motor*, dan hubung singkat. Pengamatan kestabilan sistem diperoleh melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor generator sistem dengan membandingkan hasil respon tersebut terhadap standar ANSI/IEEE C37.106-1987 mengenai frekuensi abnormal turbin.

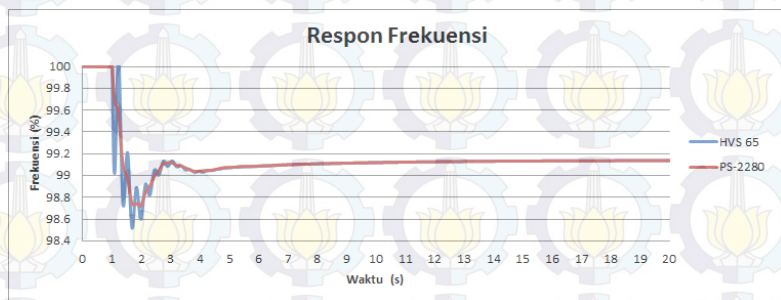
##### **4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas/Generator Outage**

Pada kasus generator lepas dari sistem kelistrikan, diasumsikan bahwa terdapat satu generator hingga dua generator *trip* secara tiba-tiba

setelah sistem beroperasi selama 1 detik. Generator yang diasumsikan trip adalah generator TG65 dan TG66 yang keduanya terhubung pada bus HVS 65 (6 kV). Kapasitas daya terpasang pada generator TG65 sebesar 11,5 MW sedangkan kapasitas daya terpasang pada generator TG66 adalah sebesar 8,5 MW.

#### 4.3.1.1 1Gen.OFF : 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ )

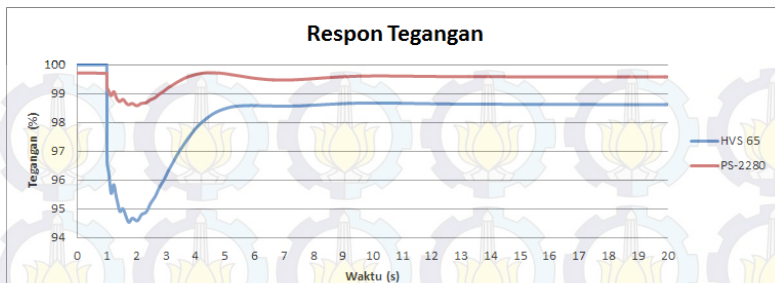
Pada kasus 1Gen.OFF ditunjukkan bahwa generator TG65 OFF ketika sistem berjalan selama 1 detik dengan asumsi semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati melalui simulasi transien pada *software* ETAP 12.6 pada bus PS-2280 (11,5 kV) dan bus HVS 65 (6 kV). Berikut pada Gambar 4.1 merupakan respon frekuensi ketika 1 generator lepas dari sistem.



**Gambar 4.1** Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem.

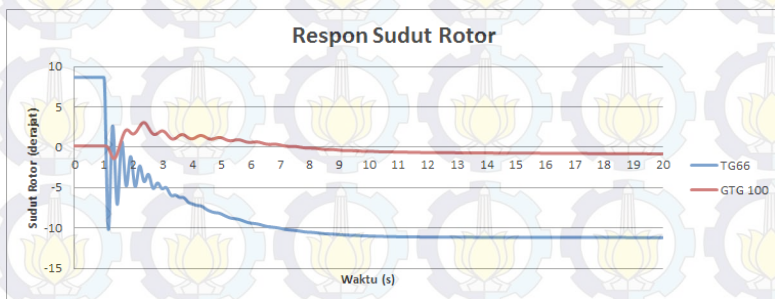
Pada Gambar 4.1 ditunjukkan bahwa sistem mengalami gangguan ketika sistem sedang berjalan selama 1 detik dengan lama simulasi transien adalah 20 detik. Respon frekuensi sistem mengalami penurunan frekuensi dengan nilai terendah yaitu sebesar 98,517% pada 1,681 detik. Penurunan frekuensi secara drastis ini diakibatkan oleh lepasnya generator pada sistem dengan daya suplai generator ke sistem sebesar 10 MW. Berdasarkan data di atas, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi maksimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan pelepasan beban untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.





**Gambar 4.2** Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.2 ditunjukkan bahwa ketika sistem sedang berjalan selama 1 detik, terjadi gangguan generator TG65 lepas dari sistem. Hal ini mengakibatkan tegangan sistem pada bus HVS 65 (6 kV) dan PS-2280 (11,5 kV) mengalami penurunan. Penurunan tegangan terendah terjadi pada bus yang terhubung dengan generator langsung. Penurunan besarnya tegangan ini terjadi hingga mencapai 94,5478% pada 1,751 detik. Respon turunnya tegangan ini diakibatkan oleh generator sistem yang lepas sehingga beban pada sistem berupaya memperoleh arus nominal beban sedangkan jumlah beban total yang harus ditanggung sistem adalah sama. Dengan jumlah daya yang tetap dan arus yang harus disuplai menuju beban sangat besar, maka tegangan sistem akan mengalami penurunan. Pada kondisi ini berdasarkan standar tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman sehingga sistem dapat beroperasi pada keadaan tegangan di atas.



**Gambar 4.3** Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem.

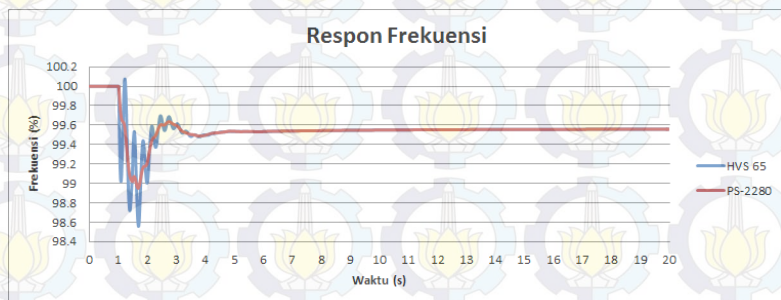


Pada Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa respon sudut rotor dari generator TG66 dan GTG 100 mengalami osilasi. Hal ini diakibatkan karena sistem mengalami generator lepas secara tiba-tiba sehingga sudut rotor generator berosilasi beberapa saat. Pada Gambar 4.3 tersebut, respon sudut rotor terendah terjadi pada generator GTG 100 dengan nilai sudut rotor terendah ketika terjadi osilasi yaitu mencapai  $-10,18^\circ$  pada 1,151 detik dan respon sudut rotor tertinggi terjadi ketika  $2,63^\circ$  pada 1,301 detik. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor yang telah ditetapkan.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor masih berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon sudut tersebut. Namun, respon frekuensi sistem jika dibandingkan dengan batas aman frekuensi berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 belum memenuhi standar tersebut sehingga pada sistem harus dilakukan pelepasan beban/*load shedding* berdasarkan nilai frekuensi yang telah ditentukan dalam standar.

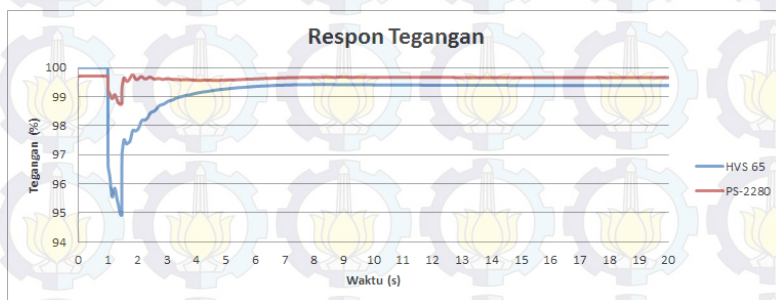
#### 4.3.1.2 1Gen.OFF + LS1: 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + *load shedding* 1 (LS1)

Pada kasus 1Gen.OFF + LS1 akan ditunjukkan hasil simulasi analisis kestabilan transien ketika pembangkit TG65 lepas pada saat sistem berjalan selama 1 detik dengan semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Jumlah total beban sistem adalah 53,935 atau 54 MW. Untuk mempertahankan frekuensi beroperasi pada kondisi yang telah ditentukan, total beban yang harus dilepas adalah 10% dari jumlah beban total tersebut.



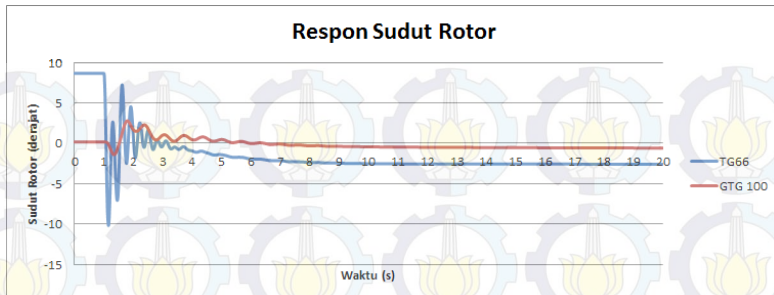
**Gambar 4.4** Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1).

Pada Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa ketika sistem sedang berjalan, 1 detik kemudian sistem mengalami gangguan lepas generator yaitu generator TG65. Frekuensi pada bus yang terhubung langsung dengan generator yaitu bus HVS 65 beresilasi akibat pelepasan beban sebesar 5,5 MW hingga mencapai titik paling rendah yaitu sebesar 98,5579% pada 1,682 detik dan mencapai titik tertinggi pada 100,075% pada 1,211 detik. Pelepasan beban dilakukan ketika frekuensi sistem berada pada batas minimum standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu sebesar 98,84%. Batas frekuensi di bawah standar terjadi pada 98,812% di 1,351 detik. Pelepasan beban pertama membutuhkan waktu 6 *cycle* atau 0,12 detik. Sehingga, pelepasan beban sistem dilakukan pada  $1,351 + 0,12 = 1,471$  detik. Berdasarkan hasil pelepasan beban pertama, frekuensi sistem masih melebihi batas 100% namun masih dalam kondisi yang aman berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan.



**Gambar 4.5** Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1).

Pada Gambar 4.5, dapat diketahui bahwa respon tegangan sistem naik secara drastis akibat adanya pelepasan beban pada sistem. Respon tegangan dibandingkan dengan Gambar 4.2 mengalami peningkatan yang mana berarti tegangan pada bus HVS 65 beroperasi pada kenaikan tegangan yang aman berdasarkan standar tegangan. Titik respon tegangan paling rendah terjadi pada 94,9145% pada 1,451 detik kemudian mulai naik hingga mengalami *steady state* pada 99,3901% di 6,762 detik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan pelepasan beban yang terhubung pada sistem sebesar 5,5 MW, respon tegangan kembali pada keadaan normal. Dengan kata lain, sistem dapat beroperasi dalam kondisi tersebut berdasarkan standar tegangan yang telah ditetapkan.



**Gambar 4.6** Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1).

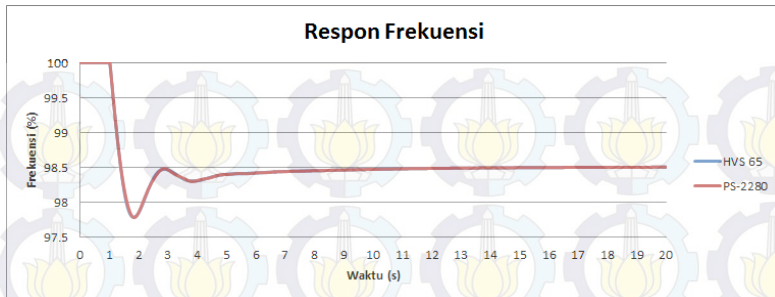
Pada Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa ketika 1 detik tiba-tiba sistem mengalami gangguan, respon sudut rotor pada generator TG66 terus berosilasi untuk mempertahankan kestabilan sistem. Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada  $-10,18^\circ$  di 1,151 detik. Sedangkan respon sudut rotor tertinggi terjadi pada  $7,25^\circ$  di 1,612 detik. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 1 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% atau sekitar 5,4-5,5 MW.

#### 4.3.1.3 2Gen.OFF : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ )

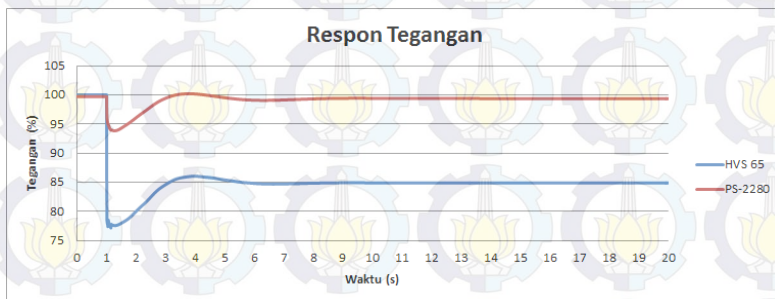
Pada kasus 2Gen.OFF ditunjukkan bahwa generator TG65 dan TG66 OFF ketika sistem berjalan selama 1 detik dengan asumsi semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati melalui simulasi transien pada bus yang mewakili beberapa tegangan yaitu bus PS-2280 (11,5 kV) dan bus HVS 65 (6 kV). Berikut pada Gambar 4.7 merupakan respon frekuensi ketika 2 generator lepas dari sistem.





**Gambar 4.7** Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa sistem beroperasi selama 1 detik sebelum terjadi gangguan 2 generator lepas dari sistem yaitu generator TG65 dan generator TG66. Lepasnya 2 generator tersebut mengakibatkan respon frekuensi yang menurun drastis pada 97,7826% di 1,811 detik. Frekuensi tersebut beresilasi hingga mencapai keadaan *steady state* yaitu pada 98,44% di 7,061 detik. Penurunan ini mengakibatkan frekuensi turun sehingga sistem berada pada kondisi yang belum aman. Oleh karena itu, perlu dilakukan pelepasan beban untuk mempertahankan frekuensi dikeadaan yang sesuai dengan batas standar frekuensi menurut IEEE Std C37.106-2003.

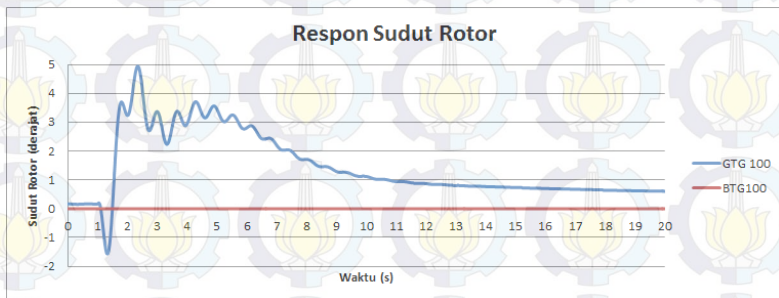


**Gambar 4.8** Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa sistem terjadi gangguan pada 1 detik kemudian sistem mengalami tegangan turun/*drop* tegangan akibat 2 generator lepas. Turunnya tegangan disebabkan oleh hilangnya



suplai daya dari generator TG65 dan TG66 ke beban dengan total daya sekitar 17 MW. Nilai paling rendah akibat adanya gangguan ini adalah 77,2039% yang terjadi pada 1,141 detik. Berdasarkan data respon tegangan tersebut, maka perlu dilakukan pelepasan beban sehingga *drop* tegangan dapat kembali sesuai standar yang telah ditetapkan.



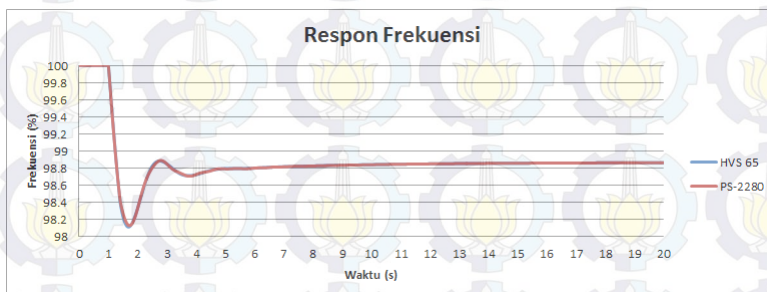
**Gambar 4.9** Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.9, respon sudut rotor BTG100 tetap bernilai  $0^\circ$ . Hal ini karena sudut rotor generator BTG100 merupakan referensi sudut generator lainnya. Sedangkan respon sudut rotor generator GTG 100 mengalami osilasi. Osilasi tertinggi terjadi pada  $4,94^\circ$  di 2,331 detik sedangkan osilasi terendah sistem terjadi ketika  $-1,57^\circ$  di 1,321 detik. Berdasarkan respon sudut rotor yang telah dijelaskan, sistem masih berada dalam kondisi aman sehingga dapat beroperasi dengan keadaan tersebut.

Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor ditetapkan dalam standar sehingga batas operasi yang aman dapat diketahui berdasarkan seluruh respon tersebut. Dari keseluruhan respon yang didapat, frekuensi dan tegangan tidak dalam kondisi yang aman sehingga perlu dilakukan pelepasan beban ke-1 untuk mengetahui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor apakah sudah berada pada kategori aman ataukah masih berada pada kategori kritis. Apabila setelah pelepasan beban tahap pertama dilakukan ternyata sistem masih berada pada kondisi yang tidak stabil, maka harus dilanjutkan dengan pelepasan beban ke-2 untuk melindungi sistem tersebut. Pelepasan beban harus dilakukan untuk menjaga sistem berada pada kondisi yang stabil sehingga sistem dapat beroperasi dengan baik.

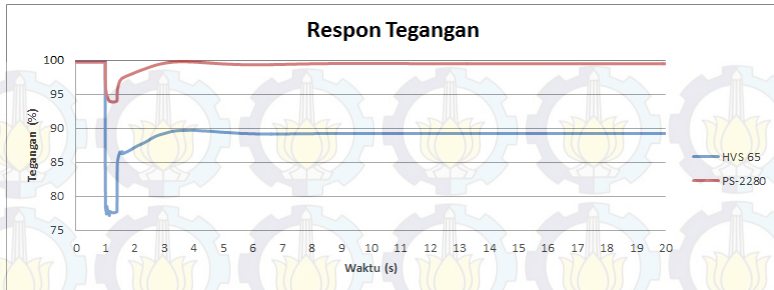
#### 4.3.1.4 2Gen.OFF + LS1 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load shedding 1 (LS1)

Pada kasus Gen2.OFF + load shedding 1 (LS1) ditunjukkan bahwa generator TG65 dan TG66 OFF ketika sistem berjalan selama 1 detik dengan asumsi semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati melalui simulasi transien pada bus yang mewakili beberapa tegangan yaitu bus PS-2280 (11,5 kV) dan bus HVS 65 (6 kV). Berikut pada Gambar 4.10 merupakan respon frekuensi ketika 2 generator lepas dari sistem dengan pelepasan beban 1 (LS1).



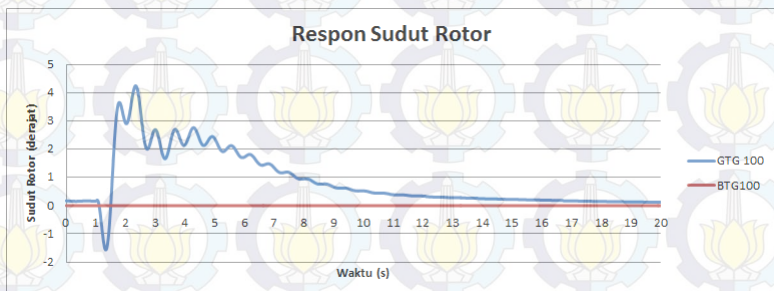
**Gambar 4.10** Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + load shedding 1 (LS1)

Pada Gambar 4.10 dapat diketahui bahwa sistem beroperasi selama 1 detik sebelum terjadinya gangguan. Ketika respon frekuensi berada pada batas bawah frekuensi standar yaitu sebesar 98,84%, maka pelepasan beban harus dilakukan. Pelepasan beban pertama dilakukan berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 saat frekuensi mencapai keadaan di bawah standar frekuensi yaitu 98,8191%. Pelepasan beban pertama sebesar 10% dari beban total yaitu sekitar 5,4–5,5 MW dan memerlukan waktu *delay* sebesar 6 *cycle* atau 0,12 detik. Prosentase sebesar 98,8191% diperoleh pada waktu 1,281 detik sehingga waktu pelepasan beban sistem harus dilakukan pada waktu  $1,281 + 0,12 = 1,401$  detik. Setelah dilakukan pelepasan beban pertama, respon frekuensi masih berada pada batas bawah standar yang ada. Sehingga berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan, maka perlu dilakukan pelepasan beban tahap 2 karena respon frekuensi berada pada nilai kurang dari 98,16% (pelepasan beban 2 langkah).



**Gambar 4.11** Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding 1* (LS1)

Pada Gambar 4.11 diketahui bahwa respon tegangan pada bus HVS 65 mengalami kedip tegangan/*voltage sag* terendah hingga mencapai 77,2437% di 1,121 detik. Ketika pelepasan beban terjadi, tegangan mulai berangsur naik hingga mencapai diatas 85% hingga berada pada kondisi *steady state* sebesar 89,1642% di 6,332 detik. Berdasarkan respon tersebut jika dibandingkan dengan standar tegangan yang telah ditetapkan, respon tegangan belum memenuhi persyaratan standar tegangan yang dianjurkan. Sehingga perlu dilakukan pelepasan beban ke-2 untuk menjaga sistem kembali ke tegangan yang memenuhi standar sehingga peralatan industri dapat bekerja dengan baik.



**Gambar 4.12** Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding 1* (LS1)

Pada Gambar 4.12, respon sudut rotor generator BTG100 berada pada 0°. Hal ini dapat disimpulkan bahwa sudut rotor generator BTG100 merupakan sudut rotor referensi terhadap sudut rotor generator lainnya.

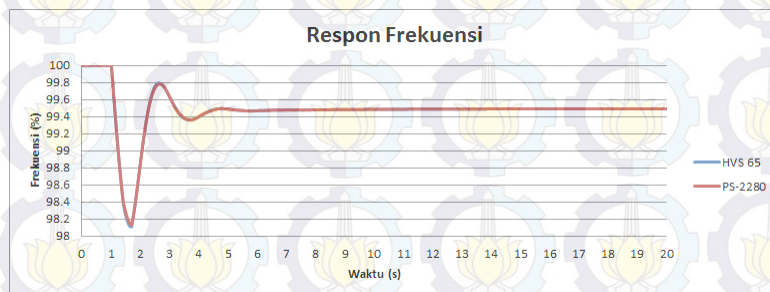


Sedangkan pada respon sudut rotor generator GTG 100 dapat diketahui bahwa ketika sistem mengalami gangguan pada 1 detik, respon sudut rotor mengalami osilasi hingga mencapai nilai terendah yaitu  $-1,56^\circ$  di 1,321 detik dan berada pada nilai tertinggi sebesar  $4,25^\circ$  di 2,332 detik. Dari perolehan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor generator masih berada dalam kondisi aman.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor setelah terjadi pelepasan beban pertama pada sistem, dapat diketahui bahwa respon frekuensi dan tegangan masih belum memenuhi persyaratan standar yang aman sehingga perlu dilakukan pelepasan beban tahap 2 (2 langkah) untuk menjaga kestabilan sistem.

#### 4.3.1.5 2Gen.OFF + LS2 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load shedding 2 (LS2)

Pada kasus 2Gen.OFF + load shedding 2, sistem mengalami gangguan akibat lepasnya generator dari sistem ketika sistem sedang beroperasi selama 1 detik. Pelepasan beban ke-2 dilakukan karena respon frekuensi dan respon tegangan belum berada pada daerah yang aman berdasarkan standar tegangan dan frekuensi yang terdapat pada ANSI/IEEE C37.106-1987. Berikut pada Gambar 4.13 akan dijelaskan mengenai respon frekuensi sistem akibat lepasnya 2 generator yaitu generator TG65 dan generator TG66.

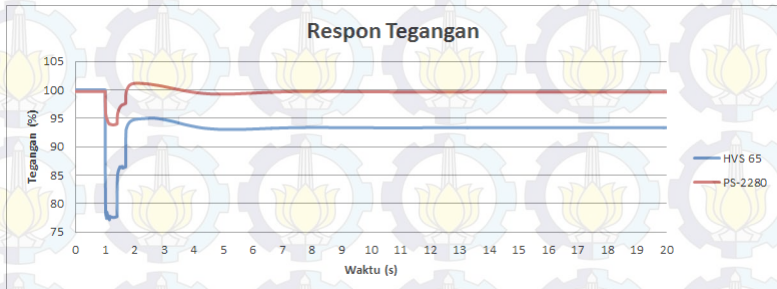


**Gambar 4.13** Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + load shedding 2 (LS2)

Pada gambar 4.13 dapat dianalisis bahwa frekuensi sistem mengalami penurunan akibat adanya gangguan pada 1 detik ketika sistem sedang beroperasi. Pelepasan beban pada sistem dilakukan ketika respon frekuensi mencapai nilai di bawah 98,16% (2 langkah)

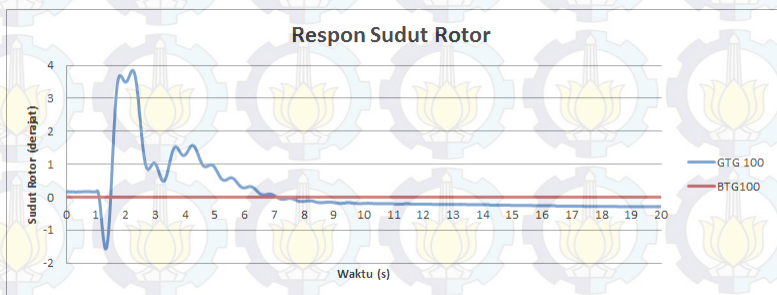


berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan. Frekuensi berada pada nilai di bawah standar pertama kali yaitu sebesar 98,1557% di 1,572 detik. Pelepasan beban ke-2 memerlukan waktu *delay* sebesar 6 cycle atau 0,12 detik. Total pelepasan beban adalah 15% dari total beban yang ditanggung sistem atau sekitar 8,1-8,2 MW. Sehingga waktu pelepasan beban tahap 2 adalah  $1,572 + 0,12 = 1,692$  detik.



**Gambar 4.14** Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding* 2 (LS2)

Pada Gambar 4.14 dapat diamati bahwa terjadi pelepasan beban ke-2 akibat respon tegangan yang turun. Dengan melepas total beban sebesar 15% dari beban total atau sekitar 8,1-8,2 MW, tegangan sistem mengalami kenaikan dibandingkan dengan ketika dilakukan pelepasan beban pertama. Kenaikan tegangan paling tinggi terjadi pada 95,0422% di 2,583 detik. Berdasarkan data tersebut, respon tegangan sudah berada pada kondisi yang aman sehingga sistem dapat bekerja dengan baik pada daerah tegangan ketika dilakukan pelepasan beban ke-2.



**Gambar 4.15** Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding* 2 (LS2)

Pada Gambar 4.15, respon sudut rotor BTG100 bernilai  $0^\circ$  karena merupakan sudut rotor referensi generator. Sedangkan disisi lain, sudut rotor GTG 100 mengalami osilasi ketika sistem mengalami gangguan pada 1 detik mencapai nilai terendah yaitu sebesar  $-1,56^\circ$  di 1,321 detik dan mencapai nilai tertinggi pada  $3,86^\circ$  di 2,223 detik. Respon sudut rotor ini berada dalam kondisi *steady state* pada  $-0,18^\circ$  di 10,003 detik. Respon sudut rotor ini berdasarkan standar masih berada dalam kondisi yang aman sehingga sistem diperbolehkan beroperasi dengan keadaan tersebut.

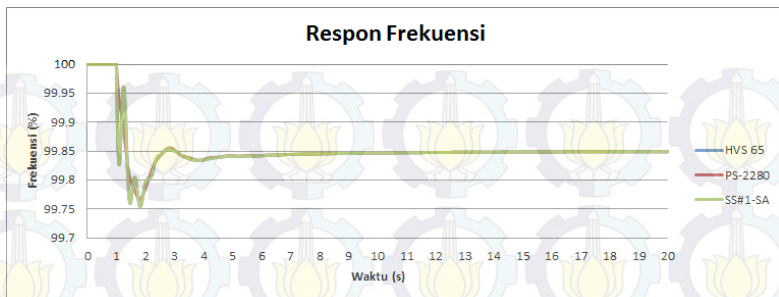
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada seluruh respon setelah dilakukan pelepasan beban ke-2, maka dapat disimpulkan bahwa sistem tersebut aman. Pada kondisi lepasnya 2 generator yaitu TG65 dan TG66, sistem harus melakukan pelepasan beban sebesar 25% dengan rincian 10% dilakukan pada pelepasan beban pertama dan 15% dilakukan pada pelepasan beban ke-2. Pelepasan beban sebesar 25% dari beban total harus segera diupayakan untuk mencapai keadaan sistem yang stabil. Jika tidak dilakukan maka dampak yang dapat terjadi semakin besar karena mampu menimbulkan resiko kerusakan pada alat-alat industri yang sedang beroperasi.

#### **4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien *Starting Motor***

Pada simulasi kestabilan transien *starting motor*, diasumsikan bahwa sebuah motor induksi tiga fasa akan dioperasikan/dihubungkan ke sistem sesaat setelah sistem beroperasi. Motor yang dioperasikan memiliki daya yang cukup besar sehingga memiliki pengaruh terhadap kestabilan sistem yang akan dianalisis. Respon kestabilan akan dipantau melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem kelistrikan dengan membandingkan nilai respon terhadap standar yang telah digunakan sebelumnya.

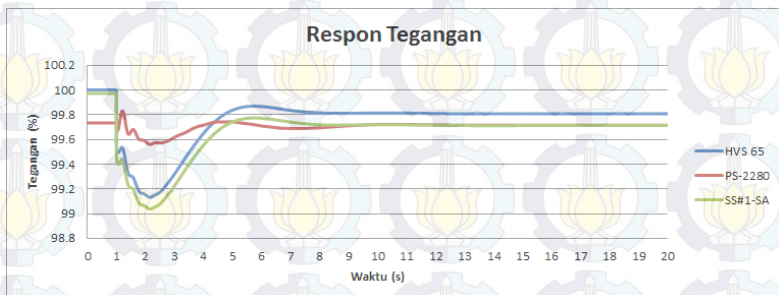
##### **4.3.2.1 MS1 : 1 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 1 detik ( $t=1s$ )**

Pada kasus MS1 yaitu motor akan beroperasi ketika sistem baru beroperasi selama 1 detik. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati dengan mempertimbangkan referensi standar tegangan yang berdasar pada IEEE Std C37.106-2003. Motor yang akan beroperasi merupakan motor induksi tiga fasa dengan ID motor yaitu MC-1301 yang memiliki kapasitas daya 4000 kW. Berikut pada Gambar 4.16 akan dilihat respon frekuensi sistem ketika motor di-*start*.



**Gambar 4.16** Respon frekuensi ketika motor MC-1301 *start* dari sistem.

Pada Gambar 4.16 dapat diketahui bahwa motor MC-1301 dihubungkan ke sistem ketika sistem sedang beroperasi selama 1 detik. Frekuensi pada bus SS#1-SA (6 kV) mengalami penurunan sesaat akibat arus *start* motor besar hingga bisa mencapai 6-10 kali arus nominal motor. Penurunan frekuensi tersebut berada pada titik terendah yaitu 99,7546% di 1,821 detik. Sedangkan kenaikan frekuensi tertinggi setelah *start* motor berada pada 99,9611% di 1,251 detik. Berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan, respon frekuensi ini masih berada dalam kondisi aman sehingga sistem penyalan/*start* motor dengan daya sebesar 4000 kW yaitu motor MC-1301 tidak mengganggu sistem kelistrikan secara umum.

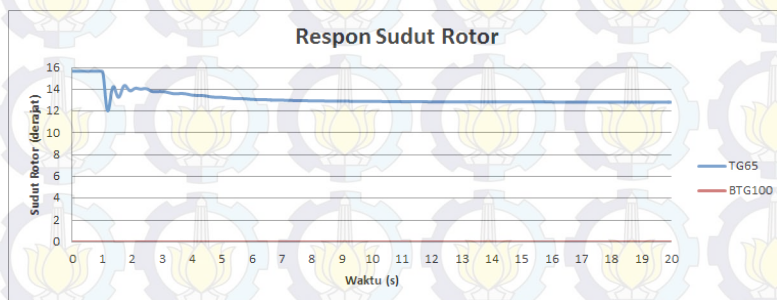


**Gambar 4.17** Respon tegangan ketika motor MC-1301 *start* dari sistem.

Pada Gambar 4.17 dapat diketahui bahwa respon tegangan seketika mengalami penurunan akibat *starting motor* MC-1301 pada bus SS#1-



SA. Penurunan tegangan diakibatkan adanya arus *start* motor dengan daya besar yang dihubungkan ke sistem. Arus yang dibutuhkan untuk *start* umumnya sebesar 6-10 kali arus nominal motor. Dengan daya yang tetap, maka melonjaknya arus *start* akan mempengaruhi tegangan sistem sesaat ketika motor mulai dihubungkan pada bus tersebut. Penurunan tegangan terendah yang terjadi akibat adanya *start* motor MC-1301 adalah 99,0378% di 2,151 detik. Sedangkan respon keadaan *steady state* pada bus SS#1-SA setelah motor dihubungkan ke sistem yaitu terdapat pada 99,7157% di 8,451 detik. Berdasarkan kondisi respon tegangan tersebut, respon tegangan masih berada pada kategori aman sehingga motor dengan daya 4000 kW masih boleh beroperasi ketika sistem sedang berjalan karena *drop* tegangan yang terjadi masih berada pada rentang aman berdasarkan standar tegangan.



**Gambar 4.18** Respon sudut rotor ketika motor MC-1301 *start* dari sistem.

Pada Gambar 4.18 dapat dianalisis bahwa respon sudut rotor generator BTG100 berada pada nilai  $0^\circ$ . Hal ini disebabkan karena sudut rotor generator BTG100 merupakan sudut referensi generator sistem. Sedangkan disisi lain, respon sudut rotor TG65 dapat diketahui bahwa sistem mengalami gangguan pada 1 detik ketika sistem sedang beroperasi. Nilai terendah yang diakibatkan oleh gangguan ini adalah sebesar  $12,03^\circ$  di 1,191 detik. Sedangkan respon tertinggi akibat gangguan yaitu  $14,36^\circ$  di 1,751 detik.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada kasus *starting motor* MC-1301 dapat disimpulkan bahwa sistem tidak mengalami masalah berarti akibat adanya arus *start* motor MC-1301



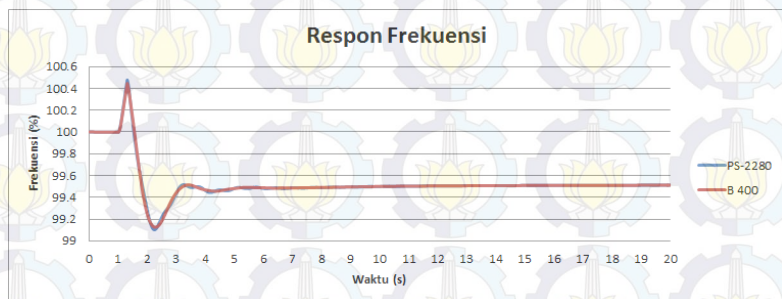
yang relatif besar. Keseluruhan respon masih berada pada kategori aman berdasarkan standar yang ada.

#### 4.3.3 Simulasi Kestabilan Transien Hubung Singkat / *Short Circuit*

Pada simulasi kestabilan transien akibat hubung singkat pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik, diasumsikan bahwa terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada salah satu bus yang ada pada sistem. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati setelah sistem mengalami gangguan. Kemudian, respon yang dihasilkan setelah terjadinya gangguan hubung singkat tiga fasa akan dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan untuk menentukan langkah-langkah yang harus dilakukan untuk tetap mempertahankan kestabilan sistem tenaga.

##### 4.3.3.1 SC1 : Hubung Singkat / *Short Circuit 1 (SC1)*

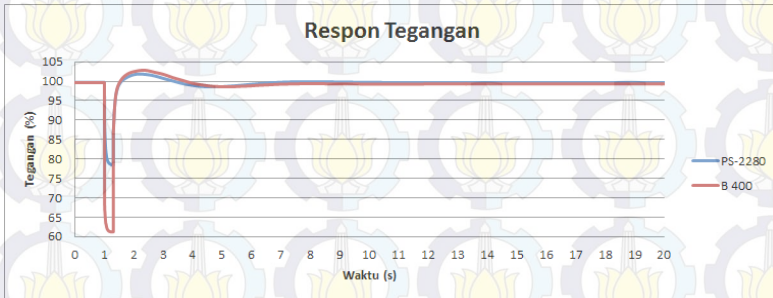
Pada kasus hubung singkat 1, diasumsikan terjadi hubung singkat pada bus HVS 65 (6 kV) setelah sistem beroperasi selama 1 detik. *Circuit breaker* beroperasi seketika yaitu sebesar 0,3 detik ketika bus mengalami hubung singkat tiga fasa untuk mengamankan sistem. Berikut pada Gambar 4.19 adalah respon frekuensi pada kasus hubung singkat 1.



**Gambar 4.19** Respon frekuensi ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.

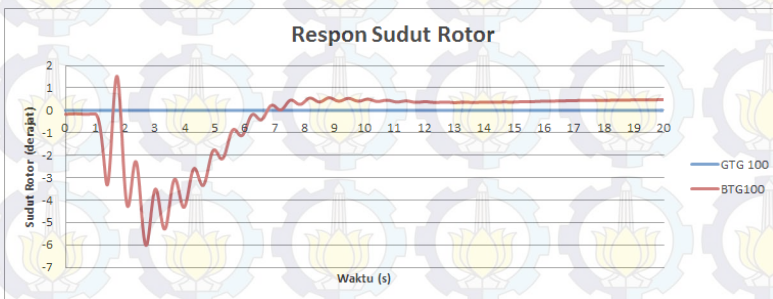
Pada Gambar 4.19 dapat diketahui bahwa respon frekuensi meningkat dengan cepat karena adanya beban pada sistem cukup besar yang hilang akibat adanya gangguan hubung singkat hingga frekuensi menyentuh angka tertinggi pada 100,446% di 1,301 detik. Gangguan tersebut kemudian dilepaskan dari sistem saat 0,3 detik dengan

membuka CB TG9 untuk melindungi sistem agar tetap dapat beroperasi sehingga respon frekuensi turun sesaat kemudian beresilasi hingga kondisi sistem stabil pada 99,4844% di 6,361 detik.



**Gambar 4.20** Respon tegangan ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada Gambar 4.20 dapat dianalisis bahwa sistem mengalami *drop* tegangan dengan sangat cepat ketika mengalami gangguan pada 1 detik. Tegangan pada pusat gangguan turun drastis sehingga membuat arus mengalir ke pusat gangguan. Untuk mempertahankan sistem, maka gangguan hubung singkat di bus HVS 65 harus segera dihilangkan dengan cara membuka CB pada daerah yang mengalami gangguan yaitu CB TG9. Respon tegangan ketika sistem pada bus HVS 65 dilepas adalah terjadi peningkatan tegangan mencapai nilai tertinggi pada 102,82% di 2,321 detik. Setelah itu keadaan tegangan menjadi lebih stabil dengan titik kestabilan yang dicapai pada 99,241% di 7,031 detik.



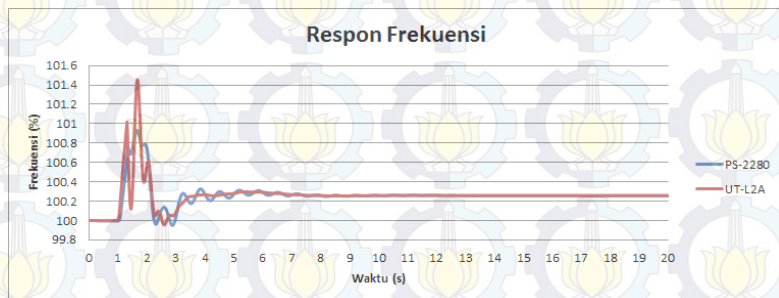
**Gambar 4.21** Respon sudut rotor ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada Gambar 4.21 respon sudut rotor generator GTG 100 bernilai  $0^\circ$  karena sudut rotor pada generator tersebut dijadikan referensi terhadap sudut rotor generator lain. Pada kasus ini dapat dilihat bahwa respon sudut rotor generator yang letaknya dekat dengan lokasi terjadinya gangguan hubung singkat mengalami osilasi selama beberapa detik akibat adanya gangguan dan pelepasan gangguan dari sistem sehingga sudut rotor akan beroperasi untuk mencapai nilai kestabilannya. Sudut rotor generator BTG100 mengalami kenaikan sudut rotor tertinggi pada  $1,53^\circ$  di 1,721 detik dan penurunan terendah pada  $-6,02^\circ$  di 2,691 detik. Respon sudut rotor berada pada titik yang stabil pada  $0,35^\circ$  di 13,081 detik.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem masih berada pada kategori yang aman. Hal ini didasarkan pada standar yang mengacu pada IEEE Std C37.106-2003 (*Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987*).

#### 4.3.3.2 SC2 : Hubung Singkat / Short Circuit 2 (SC2)

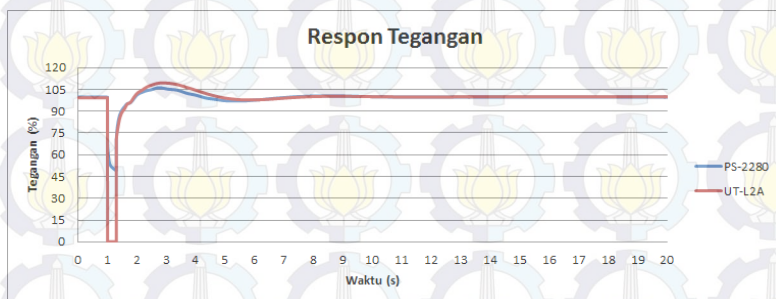
Pada kasus SC2 yaitu kasus hubung singkat 2 yang terjadi pada bus HVS-27 (20 kV). Gangguan hubung singkat terjadi pada sistem ketika sistem baru beroperasi selama 1 detik. Untuk mengamankan peralatan, maka CB 02CB33 beroperasi seketika dengan waktu operasi 0,3 detik setelah gangguan. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati dengan membandingkan hasil respon sistem *existing* dan standar yang telah ditetapkan pada ANSI/IEEE C37.106-1987. Pada Gambar 4.22 berikut akan ditunjukkan respon frekuensi sistem ketika gangguan berlangsung setelah 1 detik.



**Gambar 4.22** Respon frekuensi ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.



Pada Gambar 4.22 dapat diketahui bahwa sistem beroperasi selama 1 detik sebelum sistem mengalami gangguan hubung singkat di bus HVS-27 (20 kV). Respon frekuensi naik dengan cepat ketika sistem mengalami gangguan dengan keadaan frekuensi paling tinggi terdapat pada 101,453% di 1,661 detik. Respon tersebut berada dalam kondisi *steady state* sebesar 100,255% di 8,191 detik. Kenaikan frekuensi berhubungan erat dengan kecepatan putar rotor suatu generator. Semakin tinggi kenaikan frekuensi yang terjadi, maka semakin tinggi juga kecepatan putar rotor generator. Hal ini karena frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan (rpm). Namun, berdasarkan hasil respon frekuensi tersebut, frekuensi masih berada pada kategori aman.

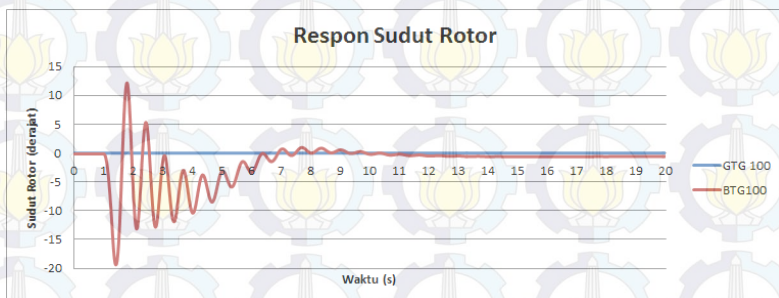


**Gambar 4.23** Respon tegangan ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada gambar 4.24 dapat dianalisis bahwa tegangan bus yang terletak dekat dengan bus yang mengalami gangguan yaitu bus UT-L2A mengalami penurunan tegangan dengan sangat cepat ketika sistem mengalami gangguan hubung singkat. Tegangan pada bus turun akibat adanya arus gangguan yang cukup besar ke sistem sehingga mengakibatkan *drop* tegangan yang cukup besar. Untuk melindungi sistem agar tetap dapat beroperasi maka dilakukan pembukaan CB yaitu CB 02CB33 yang terletak tepat di atas bus UT-L2A. Pembukaan CB dilakukan pada 0,3 detik setelah sistem mengalami gangguan hubung singkat. Respon tegangan setelah dilakukannya pembukaan CB untuk menetralkan gangguan dapat dilihat bahwa sistem langsung kembali ke keadaan normal meskipun terjadi kenaikan tegangan/*voltage swell* akibat *switching* beban yang cukup besar. Kenaikan tegangan tertinggi



terjadi pada 109,432% di 2,871 detik. Respon tegangan mencapai keadaan *steady state* sebesar 100,235% di 8,651 detik.



**Gambar 4.24** Respon sudut rotor ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada Gambar 4.24, respon sudut rotor GTG 100 berada pada posisi  $0^\circ$ . Sehingga dapat diketahui bahwa sudut rotor GTG 100 digunakan sebagai referensi sudut rotor generator lainnya. Respon generator lainnya seperti generator BTG100 mengalami osilasi akibat adanya gangguan hubung singkat pada bus HVS-27. Penurunan sudut rotor terendah terjadi pada  $-19,38^\circ$  di 1,401 detik sedangkan kenaikan sudut rotor tertinggi terjadi pada  $12,16^\circ$  di 1,781 detik. Respon sudut rotor yang diperlihatkan pada Gambar 4.24 masih berada pada kategori aman sehingga sistem masih diperbolehkan beroperasi dalam keadaan tersebut.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa sistem masih berada pada kondisi aman ketika bus HVS-27 mengalami gangguan dan CB 02CB33 terbuka dari sistem 0,3 detik setelah gangguan hubung singkat. Pada keadaan ini, sistem masih diizinkan untuk tetap beroperasi berdasarkan standar yang telah ditetapkan.

#### 4.4 Rekapitulasi Data Kestabilan di PT. Petrokimia Gresik

Hasil seluruh respon sistem akibat adanya gangguan lepasnya generator, *starting motor*, dan hubung singkat utamanya respon frekuensi dan tegangan sistem terdapat pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.5 berikut:

**Tabel 4.2** Rekapitulasi data *load shedding*

Studi Kasus	Load Shedding	Waktu (s)	Beban (%)	MW
Gen1.OFF	1	1,471 s	10 %	5,5 MW
Gen2.OFF	1	1,401 s	10%	5,5 MW
	2	1,692 s	15%	8,2 MW
Total			25%	13,7 MW

**Tabel 4.3** Rekapitulasi data studi kasus generator lepas

Studi Kasus	Bus ID	f min. (%)	Waktu (s)	V min. (%)	Waktu (s)	Kondisi	
						f	V
1Gen.OFF	HVS 65	98,517	1,681	94,5478	1,751	x	√
1Gen.OFF + LS1	HVS 65	98,5579	1,682	94,9145	1,451	√	√
2Gen.OFF	HVS 65	97,7826	1,811	77,2039	1,141	x	x
2Gen.OFF + LS1	HVS 65	98,8191	1,281	77,2437	1,121	x	x
2Gen.OFF + LS2	HVS 65	98,1557	1,572	86,2679	1,592	√	√

**Tabel 4.4** Rekapitulasi data studi kasus *starting motor*

Studi Kasus	Bus ID	f min. (%)	Waktu (s)	V min. (%)	Waktu (s)	Kondisi	
						f	V
MS1	SS#1-SA	99,7546	1,821	99,0378	2,151	√	√

**Tabel 4.5** Rekapitulasi data studi kasus hubung singkat

Studi Kasus	Bus ID	f max. (%)	Waktu (s)	V max. (%)	Waktu (s)	Kondisi	
						f	V
SC1	B 400	100,446	1,301	102,82	2,321	√	√
SC2	UT-L2A	101,453	1,661	109,432	2,871	√	√





## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suhadi dkk, “**Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1 untuk SMK**”, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, 2008.
- [2] Suswanto, Daman, “**Diktat Kuliah: Sistem Distribusi Tenaga Listrik**”, Teknik Elektro Universitas Negeri Padang, Padang.
- [3] Marsudi, Djiteng, “**Operasi Sistem Tenaga Listrik**”, Yogyakarta : Graha Ilmu, 2006.
- [4] Saadat, Hadi, “**Power System Analysis**”, McGraw-Hill Inc., 1999.
- [5] Soeprijanto, Adi. “**Desain Kontroler untuk Kestabilan Dinamik Sistem tenaga Listrik**”. ITS Press, Surabaya, 2012.
- [6] Sulasno, “**Analisa Sistem Tenaga Listrik**”, Satya Wacana, Semarang, 1993.
- [7] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “**Definition and Classification of Power System Stability**”, IEEE Transactions on Power System , Vol. 19, No. 2, May 2004
- [8] ANSI/IEEE C37.106-1987, “**IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants**”.
- [9] Moreno-Munoz, Antonio-Munoz.”**Power Quality, Mitigation Technologies in a Distributed Environment**”. Área de Electrónica Universidad de Córdoba Campus de Rabanales 14071 Córdoba.Spanyol.Springer.2007.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Gangguan lepasnya generator pada kasus 1Gen.OFF dan 2Gen.OFF sebelum dilakukannya *load shedding* dari sistem, mengakibatkan kondisi kestabilan sistem berpotensi membahayakan kelistrikan PT. Petrokimia Gresik. Kasus tersebut menyebabkan penurunan frekuensi terendah pada bus HVS 65 sebesar 98,517% di 1,681 detik dan 97,7826% di 1,811 detik.
- 2) Pelepasan beban/*load shedding* pada kasus 1Gen.OFF sebesar 5,5 MW dan 2Gen.OFF sebesar 13,7 MW harus dilakukan untuk mempertahankan kestabilan sistem kembali pada keadaan yang diizinkan berdasarkan pada standar frekuensi ANSI/IEEE Std C37.106-2003.
- 3) *Starting motor* dengan daya sebesar 4000 kW (MC-1301) di PT. Petrokimia Gresik secara langsung ketika 4 generator beroperasi masih diizinkan. *Starting motor* MC-1301 menyebabkan penurunan respon frekuensi terendah sebesar 99,7546% di 1,821 detik dan penurunan respon tegangan terendah sebesar 99,0378% di 2,151 detik.
- 4) Gangguan hubung singkat/*short circuit* dapat mengakibatkan respon frekuensi dan tegangan sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik menjadi tidak stabil. Namun, sistem pengamanan bekerja dengan baik pada 0,3 detik setelah gangguan pada bus HVS 65 (6 kV) sehingga respon frekuensi di bus B 400 menjadi stabil hingga mencapai keadaan *steady state* sebesar 99,4844% di 6,361 detik dan respon tegangan berada dalam kondisi yang sama pada 99,421% di 7,031 detik. Sedangkan pada kasus hubung singkat di bus HVS-27 (20 kV), respon frekuensi di bus UT-L2A berada dalam kondisi *steady state* sebesar 100,255% di 8,191 detik dan respon tegangan berada dalam kondisi yang sama pada 100,235% di 8,651 detik.

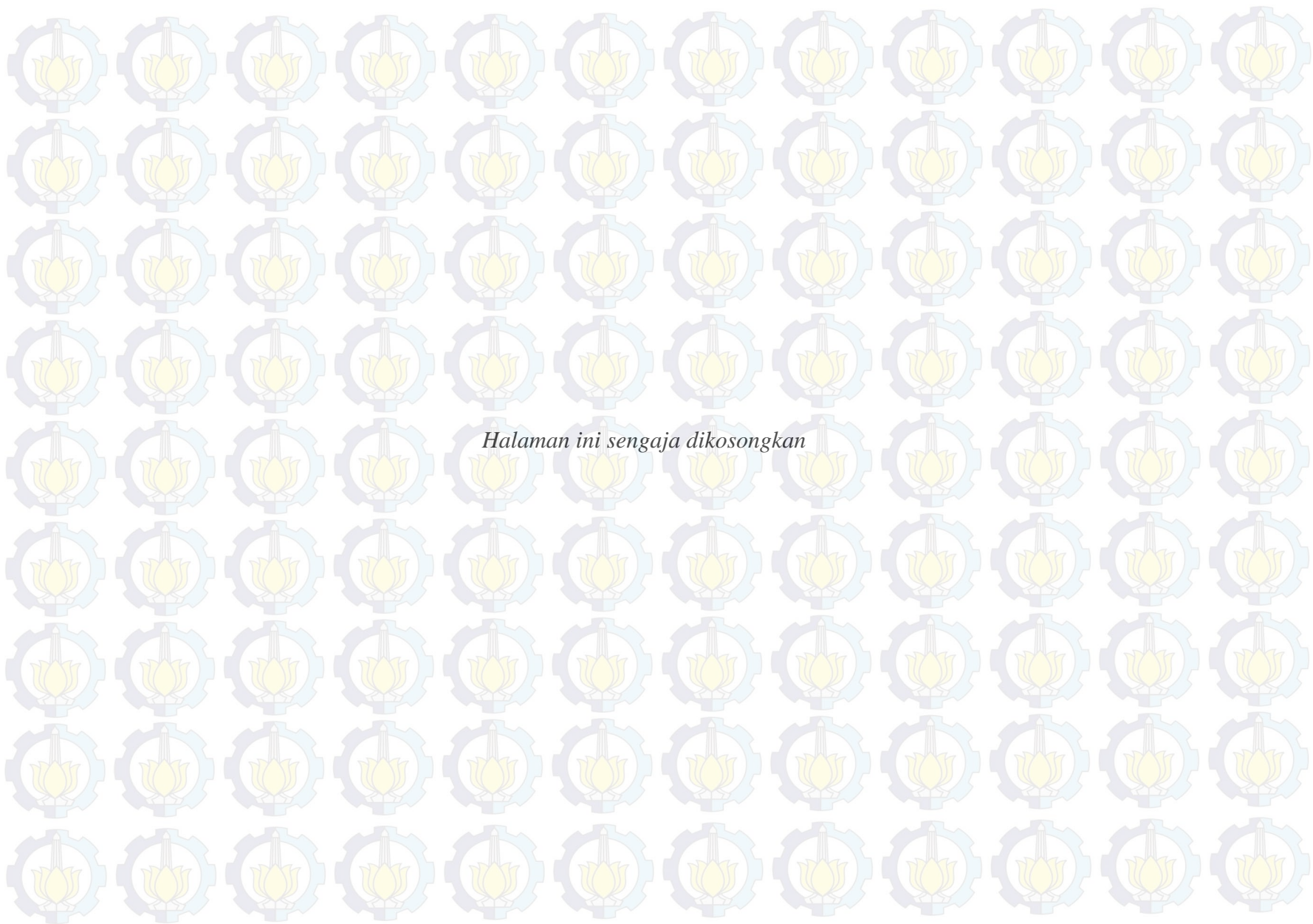
## 5.2 Saran

- 1) Apabila pada sistem terdapat prioritas beban, maka pelepasan beban dilakukan terutama pada beban-beban yang tidak terlalu berpengaruh pada sistem produksi di pabrik tersebut.
- 2) Dalam perancangan pelepasan beban, beban-beban yang dilepas sebaiknya berada didekat generator yang mengalami gangguan.



# LAMPIRAN A SINGLE LINE DIAGRAM PT. PETROKIMIA GRESIK









# ***Transient Stability Analysis in PT. Petrokimia Gresik due to The Integration of Factory I, II, III, Coal Unit and PLN Using Ring Distribution System***

*Name* : Muhammad Wimas Adhyatma  
*NRP* : 2213105066  
*Advisor Lecturer* : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

## ***ABSTRACT***

*Transient stability is the ability of the power system to maintain synchronization and balance between the power of generation with the power on the load system. In this state, generators rotate at a synchronous speed. Large disturbances that occur suddenly such as loss of generation, large power motor starting and short circuit are capable of resulting in the acceleration and deceleration at the rotor rotation which cause loss of synchronization in electrical systems.*

*The integration of the electrical system in PT. Petrokimia Gresik using ring distribution system has the advantage that the distribution of electric power can be supplied through two or more generators. Response stability of the power system in PT. Petrokimia Gresik is performed to determine the system response due to sudden disturbance so that reliable stability recommendations can be applied.*

*Response stability on the transient period can be observed through the frequency response, voltage and rotor angle in normal and disturbance conditions. To determine the limits of good stability on an industrial electrical systems, then the standard limits are confirmed normal frequency, voltage and rotor angle ability. The standards that used are based on IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987) on securing the abnormal frequency turbine using load shedding method.*

***Keywords:*** Transient Stability, Load Shedding, PT. Petrokimia Gresik, Ring Distribution.





## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang mana atas rahmat dan hidayah-Nya maka penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

### **“ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK AKIBAT INTEGRASI PABRIK I, II, III, UNIT BATU BARA DAN PLN MENGGUNAKAN SISTEM DISTRIBUSI RING”**

Tugas Akhir ini merupakan karya tulis ilmiah yang menjadi salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak membantu terutama dalam penyusunan Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Kedua orang tua atas limpahan doa, kasih sayang, dan teladan hidup bagi penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Seluruh rekan Teknik Sistem Tenaga LJ-2013 Gasal atas kebersamaannya.
4. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS & D3 Teknik Elektro Komputer Kontrol ITS.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini belum sempurna. Kritik dan saran pembaca diharapkan mampu memperbaiki kekurangan penulis dalam pembuatan laporan ini. Semoga terselesaikannya Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis serta pembaca secara luas. Terima kasih.

Surabaya, Juni 2015

Muhammad Wimas Adhyatma



# DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan Jurusan .....	iii
Abstrak .....	v
<i>Abstract</i> .....	vii
Kata Pengantar .....	ix
Daftar Isi .....	xi
Daftar Gambar .....	xv
Daftar Tabel .....	xvii

## BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Laporan .....	4
1.7 Relevansi .....	5

## BAB II. KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	7
2.1.1 Jaringan Distribusi Ring .....	8
2.2 Definisi Kestabilan Transien .....	9
2.3 Klasifikasi Kestabilan .....	13
2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor ( <i>Rotor Angle Stability</i> ) .....	14
2.3.1.1 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Kecil ( <i>Small-Disturbance Angle Stability</i> ) .....	14
2.3.1.2 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Besar ( <i>Large-Disturbance Angle Stability/Transient Stability</i> ) .....	14
2.3.2 Kestabilan Frekuensi ( <i>Frequency Stability</i> ) .....	15
2.3.3 Kestabilan Tegangan ( <i>Voltage Stability</i> ) .....	15



2.3.3.1	Kestabilan Tegangan Gangguan Kecil ( <i>Small-Disturbance Voltage Stability</i> ) .....	16
2.3.3.2	Kestabilan Tegangan Gangguan Besar ( <i>Large-Disturbance Voltage Stability</i> ) .....	16
2.3.3.2.1	Kestabilan Tegangan Jangka Pendek ( <i>Short Term Voltage Stability</i> ) .....	16
1)	Kedip Tegangan ( <i>Voltage Sag</i> ) .....	16
2)	Kenaikan Tegangan ( <i>Voltage Swell</i> ) .....	17
2.3.3.2.2	Kestabilan Tegangan Jangka Lama ( <i>Long Term Voltage Stability</i> ) .....	17
1)	Tegangan Lebih ( <i>Over Voltage</i> ) .....	18
2)	Tegangan Kurang ( <i>Under Voltage</i> ) .....	18
2.4	Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan ( <i>Rotor Dynamics and The Swing Equation</i> ) .....	19
2.5	Standar Kestabilan Transien .....	23
2.5.1	Standar Kemampuan Frekuensi Abnormal Turbin .....	23
2.5.2	Standar Batas Operasi Tegangan .....	25
2.5.3	Standar Pelepasan Beban ( <i>Load Shedding</i> ) .....	25
<b>BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK</b>		
3.1	Sistem Kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik .....	29
3.2	Motor Induksi MC-1301 (4000 kW) di PT. Petrokimia Gresik .....	32
<b>BAB IV. SIMULASI &amp; ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK</b>		
4.1	Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik .....	35
4.2	Perencanaan Studi Kasus PT. Petrokimia Gresik .....	35
1)	Generator Lepas/ <i>Generator Outage</i> .....	36
2)	<i>Starting Motor</i> .....	36

3) Hubung Singkat/ <i>Short Circuit</i> .....	36
4.3 Simulasi Kestabilan Transien.....	38
4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas/ <i>Generator Outage</i> .....	38
4.3.1.1 1Gen.OFF : 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) .....	39
4.3.1.2 1Gen.OFF + LS1 : 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load <i>shedding 1</i> (LS1).....	41
4.3.1.3 2Gen.OFF : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) .....	43
4.3.1.4 2Gen.OFF + LS1 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load <i>shedding 1</i> (LS1).....	46
4.3.1.5 2Gen.OFF + LS2 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load <i>shedding 2</i> (LS2).....	48
4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien <i>Starting Motor</i> .....	50
4.3.2.1 MS1 : 1 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 1 detik ( $t=1s$ ).....	50
4.3.3 Simulasi Kestabilan Transien Hubung Singkat / <i>Short Circuit</i> .....	53
4.3.3.1 SC1 : Hubung Singkat/ <i>Short Circuit 1</i> (SC1) .....	53
4.3.3.2 SC2 : Hubung Singkat/ <i>Short Circuit 2</i> (SC2) .....	55
4.4 Rekapitulasi Data Kestabilan di PT. Petrokimia Gresik.....	58
<b>BAB V. PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	63
<b>LAMPIRAN</b> .....	A - 1
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	B - 1



## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Standar pelepasan beban 3 langkah (60Hz) .....	26
<b>Tabel 2.2</b> Standar pelepasan beban 6 langkah (60Hz) .....	26
<b>Tabel 2.3</b> Standar pelepasan beban 3 langkah (50Hz) .....	26
<b>Tabel 2.4</b> Standar pelepasan beban 6 langkah (50Hz) .....	27
<b>Tabel 3.1</b> Data spesifikasi generator di PT. Petrokimia Gresik .....	29
<b>Tabel 3.2</b> Data spesifikasi trafo di PT. Petrokimia Gresik .....	31
<b>Tabel 3.3</b> Data motor tegangan menengah (6 kV) di Pabrik III, PT. Petrokimia Gresik .....	32
<b>Tabel 4.1</b> Studi kasus sistem pada PT. Petrokimia Gresik .....	36
<b>Tabel 4.2</b> Rekapitulasi data <i>load shedding</i> .....	58
<b>Tabel 4.3</b> Rekapitulasi data studi kasus generator lepas .....	58
<b>Tabel 4.4</b> Rekapitulasi data studi kasus <i>starting motor</i> .....	58
<b>Tabel 4.5</b> Rekapitulasi data studi kasus hubung singkat .....	59





## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 1.1</b> <i>Flowchart</i> Tugas Akhir .....	3
<b>Gambar 2.1</b> Garis besar sistem tenaga listrik .....	11
<b>Gambar 2.2</b> Perilaku generator saat terjadi gangguan .....	11
<b>Gambar 2.3</b> Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik .....	13
<b>Gambar 2.4</b> Representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektris (a) Generator (b) Motor .....	20
<b>Gambar 2.5</b> Standar batas operasi turbin uap ( <i>Over/Under frequency</i> ) .....	23
<b>Gambar 2.6</b> Standar batas operasi gas turbin ( <i>Over/Under frequency</i> ) .....	24
<b>Gambar 2.7</b> Standar batas operasi tegangan kestabilan transien .....	25
<b>Gambar 3.1</b> Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik .....	30
<b>Gambar 4.1</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem .....	39
<b>Gambar 4.2</b> Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem .....	40
<b>Gambar 4.3</b> Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem .....	40
<b>Gambar 4.4</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1) .....	41
<b>Gambar 4.5</b> Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1) .....	42
<b>Gambar 4.6</b> Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1) .....	43
<b>Gambar 4.7</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem .....	44
<b>Gambar 4.8</b> Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem .....	44
<b>Gambar 4.9</b> Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem .....	45
<b>Gambar 4.10</b> Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 1 (LS1) .....	46

<b>Gambar 4.11</b>	Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 1 (LS1).....	47
<b>Gambar 4.12</b>	Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 1 (LS1).....	47
<b>Gambar 4.13</b>	Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 2 (LS2).....	48
<b>Gambar 4.14</b>	Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 2 (LS2).....	49
<b>Gambar 4.15</b>	Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + <i>load shedding</i> 2 (LS2).....	49
<b>Gambar 4.16</b>	Respon frekuensi ketika motor MC-1301 <i>start</i> dari sistem.....	51
<b>Gambar 4.17</b>	Respon tegangan ketika motor MC-1301 <i>start</i> dari sistem.....	51
<b>Gambar 4.18</b>	Respon sudut rotor ketika motor MC-1301 <i>start</i> dari sistem.....	52
<b>Gambar 4.19</b>	Respon frekuensi ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.....	53
<b>Gambar 4.20</b>	Respon tegangan ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.....	54
<b>Gambar 4.21</b>	Respon sudut rotor ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.....	54
<b>Gambar 4.22</b>	Respon frekuensi ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.....	55
<b>Gambar 4.23</b>	Respon tegangan ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.....	56
<b>Gambar 4.24</b>	Respon sudut rotor ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.....	57

## BIODATA PENULIS



Nama : M. Wimas Adhyatma  
TTL : Gresik, 11 Agustus 1990  
Jenis Kelamin : Laki - laki  
Agama : Islam  
Alamat Rumah: Puri Taman Asri D-9,  
Sepanjang – Taman,  
Sidoarjo  
Telp./HP : 085645524751  
E-mail : wimas10@mhs.ee.its.ac.id  
m.wimas.a@gmail.com  
Hobi : Olahraga

### RIWAYAT PENDIDIKAN

- 1997 – 2003 : SD NEGERI MENANGGAL 601 SURABAYA
- 2003 – 2006 : SMP NEGERI 1 SURABAYA
- 2006 – 2009 : SMA NEGERI 6 SURABAYA
- 2010 – 2013 : Bidang Studi Komputer Kontrol, Program D3 Teknik Elektro, ITS
- 2013 – sekarang : Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Program Lintas Jalur S1 Teknik Elektro, ITS

### PRESTASI AKADEMIK

- Juara 2 kompetisi pengembangan aplikasi, *Sepuluh Nopember IT Challenge* 2013 (SNITCH 2013).
- Finalis 10 besar tingkat Nasional kategori *embedded system*, Pagelaran Mahasiswa Nasional Bidang TIK 6 (GEMASTIK 6) 2013, Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (DIKTI) 2013.

### PENGALAMAN ORGANISASI

- Anggota SKI SMA NEGERI 6 SURABAYA periode 2006 – 2007
- Panitia kejuaraan *badminton* antar SMA se-Jawa Timur tahun 2010





# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Pada pengoperasian sistem tenaga listrik, hampir setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas dan letak beban dalam sistem yang sedang beroperasi. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan maka mampu menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun sehingga mengakibatkan kinerja sistem memburuk.

Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali dapat dikatakan handal jika mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Apabila semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan terutama gangguan besar, maka sistem tersebut termasuk kategori sistem yang stabil.

Pada situasi dimana adanya penambahan kapasitas pembangkit dengan daya cukup besar atau beban besar hilang dari sistem atau bahkan terjadi gangguan pada saluran transmisi, stabilitas transien harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap perubahan beban yang relatif besar terjadi. Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, maka keseimbangan antara energi yang masuk dan energi yang keluar pada sistem akan hilang. Jika suplai energi melebihi kapasitas beban yang dipikul, respon inersia rotor mesin yang masih bekerja pada periode yang singkat akan melambat. Sebaliknya apabila beban hilang maka daya pada sistem akan melebihi beban sehingga mesin akan bergerak semakin cepat. Gangguan pada sistem biasanya diikuti oleh perubahan tegangan yang cepat pada sistem, dan pemulihan kembali tegangan dengan cepat menuju ke kondisi normal merupakan salah satu hal yang penting untuk mempertahankan stabilitas selain respon frekuensi sistem dan sudut rotor generator pembangkit.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas berkaitan dengan Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Analisis kestabilan sistem melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akibat adanya gangguan besar seperti lepasnya pembangkit, *starting motor*, dan hubung singkat secara tiba-tiba dengan menggunakan standar ANSI/IEEE.
2. Menentukan skema pelepasan beban yang handal berdasarkan kondisi sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dari beberapa studi kasus seperti generator lepas, *starting motor*, dan hubung singkat.

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam penyelesaian masalah dalam Tugas Akhir ini, terdapat batasan-batasan sebagai berikut:

1. *Software* yang digunakan adalah ETAP 12.6
2. Kestabilan sistem yang dianalisis merupakan kestabilan ketika terjadi *trip* pada pembangkit, *starting motor*, dan hubung singkat
3. Gangguan beban berlebih terjadi karena adanya *trip* pada unit pembangkit di PT. Petrokimia Gresik.
4. Skema perbaikan sistem kelistrikan yang dilakukan yaitu menggunakan skema pelepasan beban (*load shedding*)

## 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini antara lain:

1. Mengetahui pengaruh respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem akibat adanya *trip* pada pembangkit, *starting motor*, dan hubung singkat pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik
2. Melaksanakan studi kestabilan di PT. Petrokimia Gresik untuk mendapatkan rekomendasi yang sesuai sehingga gangguan-gangguan yang terjadi dapat diamankan dengan baik.
3. Merancang skema pelepasan beban yang handal sehingga sistem dapat segera kembali ke kondisi stabil.
4. Dapat menentukan langkah-langkah/solusi yang harus dilakukan akibat adanya gangguan pada sistem.

## 1.5 Metodologi

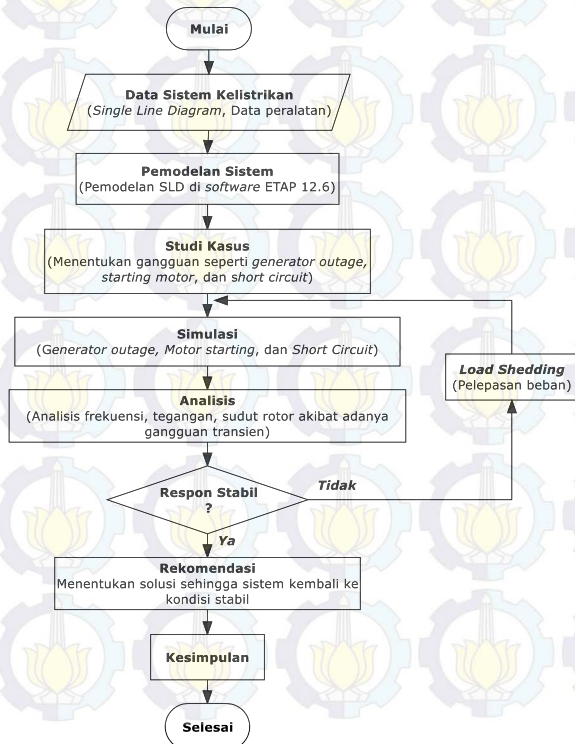
Metodologi yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan Data

Penulis melakukan pengambilan data berupa data pembangkitan maupun parameter-parameter seperti spesifikasi peralatan, data saluran, dan sebagainya.

2. Pemodelan Sistem

Setelah proses pengumpulan data mulai data pembangkitan, data peralatan, dan impedansi saluran maka sistem dimodelkan kedalam *Single Line Diagram*. Berikut pada Gambar 1.1 merupakan *flowchart* secara umum dalam penyelesaian Tugas Akhir ini:



**Gambar 1.1** *Flowchart* Tugas Akhir



### 3. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil simulasi program dan analisis data yang dilakukan, penulis dapat menarik kesimpulan berdasarkan analisis sistem sehingga solusi dari permasalahan pada Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.

## 1.6 Sistematika Laporan

Dalam penyusunan buku tugas akhir ini, pembahasan mengenai sistem alat yang dibuat dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

### 1. BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi penjelasan umum mengenai latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika laporan, dan relevansi yang berkaitan dengan Tugas Akhir ini.

### 2. BAB II. KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Berisi penjelasan teori dasar mengenai konsep yang digunakan dalam analisis kestabilan transien di PT. Petrokimia Gresik. Teori dasar mengacu pada standar IEEE yaitu ANSI/IEEE C37.106-1987 mengenai skema pelepasan beban, IEEE Std C37.106™-2003 (*Revision of* ANSI/IEEE C37.106-1987) mengenai panduan frekuensi abnormal generator pada pembangkit, dan IEEE Std 1159-1995 yang berkaitan dengan standar batas tegangan normal operasi serta gangguan-gangguan yang dapat ditimbulkan. Selain itu juga akan dibahas teori yang berkaitan dengan kestabilan transien, perancangan pelepasan beban, sistem distribusi ring, dan sebagainya.

### 3. BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

Pembahasan secara detail mengenai data peralatan dan informasi secara umum mengenai sistem kelistrikan yang ada di PT. Petrokimia Gresik. Pada bab ini juga disertakan data-data yang akan digunakan sebagai pengujian kasus pada BAB IV.

#### **4. BAB IV. HASIL SIMULASI & ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK**

Bab ini berisi tentang hasil pengujian kestabilan transien melalui simulasi menggunakan *software* ETAP serta analisis yang berkaitan dengan keadaan frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akibat adanya gangguan transien pada kasus-kasus seperti gangguan lepasnya generator, *starting motor*, dan hubung singkat.

#### **5. BAB V. PENUTUP**

Berisi kesimpulan yang diperoleh dari pembuatan Tugas Akhir ini dan saran-saran untuk pengembangan laporan Tugas Akhir selanjutnya.

##### **1.7 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari penelitian Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat antara lain:

1. Mengetahui analisis serta rekomendasi kestabilan transien melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akibat gangguan di PT. Petrokimia Gresik karena adanya sistem integrasi Pabrik I, II, III, unit batu bara dan PLN pada sistem distribusi ring.
2. Mengetahui skema pelepasan beban yang handal ketika terjadi adanya gangguan pada sistem integrasi kelistrikan yang ada di PT. Petrokimia Gresik.



## **BAB II**

### **KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

#### **2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama yaitu pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi. Secara umum, baik atau buruknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik terutama ditinjau dari kualitas daya yang diterima oleh konsumen. Kualitas daya yang baik antara lain meliputi kapasitas daya yang memenuhi dan tegangan yang selalu konstan pada tegangan nominal. Tegangan harus selalu dijaga konstan terutama rugi tegangan yang terjadi di ujung saluran. Tegangan yang tidak stabil dapat mengakibatkan kerusakan alat-alat yang peka terhadap perubahan tegangan (khususnya alat-alat elektronik). Tegangan yang terlalu rendah akan mengakibatkan alat-alat listrik tidak dapat beroperasi sebagaimana mestinya. Demikian juga tegangan terlalu tinggi dapat berpotensi merusak alat-alat listrik. Perubahan nilai frekuensi akan sangat dirasakan oleh pemakai listrik yang penggunaannya berkaitan/bergantung pada kestabilan frekuensi. Konsumen kelompok ini biasanya adalah industri-industri yang menggunakan mesin-mesin otomatis dengan menggunakan *setting* waktu/frekuensi seperti peralatan motor. Oleh karena itu, kestabilan frekuensi dan tegangan harus selalu dikontrol untuk menghindari resiko-resiko yang mungkin terjadi sehingga kerusakan hingga kegagalan sistem dapat dihindari.

Pada sistem tenaga listrik, terdapat beberapa komponen utama. Komponen tersebut terdiri atas pembangkitan tenaga listrik, transmisi tenaga listrik, serta distribusi tenaga listrik. Tiap komponen tersebut saling bergantung satu sama lain. Penjelasan tiap komponennya adalah sebagai berikut, berdasarkan referensi [1]:

1. Pembangkit tenaga listrik (pembangkitan): berfungsi membangkitkan energi listrik dengan cara merubah energi mekanik menjadi energi listrik.
2. Sistem transmisi (penyaluran): proses menyalurkan energi listrik dari satu tempat ke tempat lain (dari pembangkit listrik ke gardu induk atau dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya), dengan menggunakan penghantar yang direntangkan antara tiang-tiang (*tower*) melalui isolator-isolator, dengan sistem tegangan tinggi.



3. Sistem distribusi (distribusi): pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke instalasi pemanfaatan (pelanggan).
4. Instalasi milik pelanggan (pemanfaatan): pihak yang memanfaatkan energi listrik.

Fungsi jaringan distribusi adalah menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk distribusi (*distribution substation*) kepada pelanggan listrik dengan mutu pelayanan yang memadai. Salah satu unsur dari mutu pelayanan adalah kontinuitas pelayanan yang tergantung pada topologi dan konstruksi jaringan serta peralatan tegangan menengah. Masalah utama dalam menjalankan fungsi jaringan distribusi tersebut adalah mengatasi gangguan dengan cepat mengingat gangguan yang terbanyak dalam sistem tenaga listrik terdapat dalam jaringan distribusi, khususnya jaringan tegangan menengah 20 KV, berdasarkan referensi [1].

Istilah keandalan jaringan distribusi dapat diartikan sebagai pengamanan jaringan distribusi dalam menghindari atau meminimalisasi gangguan-gangguan yang menyebabkan pemadaman jaringan distribusi. Keandalan merupakan indikator performansi kerja suatu peralatan atau sistem sesuai dengan fungsinya dalam periode waktu dan kondisi operasi tertentu. Penyebab gangguan- gangguan pada jaringan distribusi khususnya jaringan tegangan menengah 20 KV antara lain:

- 1) Gangguan akibat alam (petir, angin, hujan)
- 2) Gangguan peralatan (hubung singkat atau *human error*)

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan disuplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer salah satunya yaitu jaringan distribusi ring, berdasarkan referensi [2].

### **2.1.1 Jaringan Distribusi Ring**

Sistem rangkaian tertutup pada jaringan distribusi merupakan suatu sistem penyaluran melalui dua atau lebih saluran *feeder* yang saling berhubungan membentuk rangkaian berbentuk cincin. Sistem ini

secara ekonomis menguntungkan, karena gangguan pada jaringan terbatas hanya pada saluran yang terganggu saja. Sedangkan pada saluran yang lain masih dapat menyalurkan tenaga listrik dari sumber lain dalam rangkaian yang tidak terganggu. Sehingga kontinuitas pelayanan sumber tenaga listrik dapat terjamin dengan baik. Yang perlu diperhatikan pada sistem ini apabila beban yang dilayani bertambah, maka kapasitas pelayanan untuk sistem rangkaian tertutup ini kondisinya akan semakin memburuk. Tetapi jika digunakan titik sumber (pembangkit tenaga listrik) lebih dari satu di dalam sistem jaringan ini maka sistem ini akan banyak dipakai, dan akan menghasilkan kualitas tegangan lebih baik, serta regulasi tegangannya cenderung kecil, berdasarkan referensi [2].

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu apabila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber, maka jaringan ini merupakan bentuk tertutup atau biasa disebut juga bentuk jaringan distribusi ring. Susunan rangkaian penyulang (*feeder*) membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil, berdasarkan referensi [2].

Secara umum bentuk sistem distribusi ring ini ada 2 macam, yaitu:

1) *Open Loop*

Bila dilengkapi dengan *normally-open switch*, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

2) *Close Loop*

Bila dilengkapi dengan *normally-close switch*, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

## 2.2 Definisi Kestabilan Transien

Dalam keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya mekanis pada *prime mover* dengan daya listrik/beban listrik pada sistem. Dalam keadaan ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya *input* mekanis pada *prime mover* dari generator-generator. Bila daya *input* mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat terjadi perbedaan yang besar antara daya

mekanis pada generator dan daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan dan perlambatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem, berdasarkan referensi [3].

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas.

Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

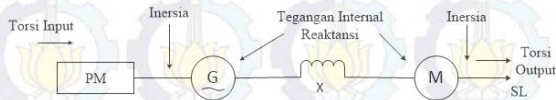
- 1) Stabilitas tetap (*steady state*)
- 2) Stabilitas peralihan (*transient*)
- 3) Stabilitas sub peralihan (*dynamic*)

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban). Stabilitas transien adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan atau satu *swing* pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) belum bekerja. Sedangkan stabilitas dinamis adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas transien) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas transien bila AVR dan governor bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis), berdasarkan referensi [4].

Ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan transien yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Kehilangan sinkronisasi ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar, maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor



bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang, faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi. Berikut pada Gambar 2.1 merupakan gambar sistem kelistrikan secara umum mulai dari daya pembangkitan hingga ke beban listrik, berdasarkan referensi [4].

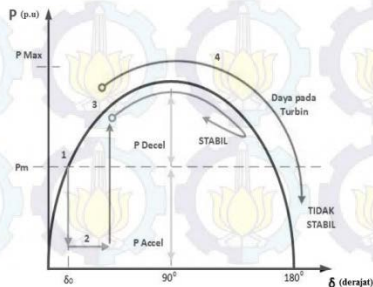


**Gambar 2.1** Garis besar sistem tenaga listrik

Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

- 1) Faktor mekanis:
  - a) Torsi input *prime* beban
  - b) Inersia dari *prime mover* dan generator
  - c) Inersia motor dan sumbu beban
  - d) Torsi input sumbu beban
- 2) Torsi elektrik:
  - a) Tegangan internal dari generator sinkron
  - b) Reaktansi sistem
  - c) Tegangan internal dari motor sinkron

Gangguan besar yang terjadi pada sistem tenaga listrik mempengaruhi kinerja generator sehingga putaran rotor generator dapat mengalami fluktuasi kecepatan. Berikut pada Gambar 2.2 merupakan perilaku generator ketika sistem mengalami gangguan.



**Gambar 2.2** Perilaku generator saat terjadi gangguan



Pada titik kerja awal (sebelum terjadi gangguan), dapat diketahui bahwa timbulnya gangguan seketika mengakibatkan daya *output* generator turun secara drastis. Selisih antara daya *output* listrik tersebut dan daya mekanis turbin mengakibatkan rotor generator mengalami percepatan, sehingga sudut rotor/daya bertambah besar. Ketika gangguan hilang, daya *output* generator pulih kembali pada harga yang sesuai dengan kurva  $p-\delta$  di atas.

Setelah gangguan hilang, daya *output* generator menjadi lebih besar daripada daya mekanis turbin. Hal ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator. Bila terdapat torsi lawan yang cukup setelah gangguan hilang untuk mengimbangi percepatan yang terjadi selama terjadinya gangguan, generator akan stabil setelah ayunan (*swing*) yang pertama dan kembali ke titik kerjanya dalam waktu kira-kira 0,5 detik. Bila kopel lawan tersebut tidak cukup besar, sudut rotor/daya akan terus bertambah besar sampai sinkronisasi dengan sistem hilang, berdasarkan referensi [5].

Pengaruh/penentuan stabilitas ditentukan dari beberapa faktor-faktor pendukung, antara lain, berdasarkan referensi [6]:

- 1) Kapasitas kemampuan alternator, semakin besar daya mampu sistem tersebut maka sistem akan semakin stabil.
- 2) Sifat dan kapasitas beban, pembebanan yang melebihi kapasitas daya pembangkitan akan mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan. Pembebanan melebihi kapasitas dalam jangka waktu yang lama juga berpotensi mengganggu kestabilan yang mampu mengakibatkan kegagalan sistem.
- 3) Gangguan: jenis, lama, dan posisi gangguan pada kejadian gangguan satu fasa ke tanah dan gangguan sementara/temporer mempunyai kondisi kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem yang mengalami gangguan lainnya.

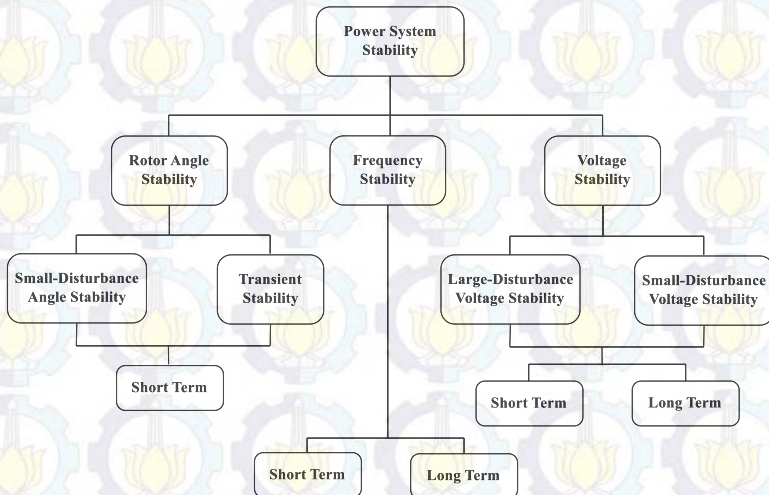
Stabilitas sistem tenaga listrik menentukan keandalan sistem. Semakin tinggi stabilitas suatu sistem, maka kestabilan sistem juga semakin tinggi. Hal ini juga mempengaruhi umur peralatan pada sistem yang digunakan. Pengoperasian pada kestabilan yang baik tentu berdampak pada keekonomisan peralatan yang berarti penggantian peralatan akibat kerusakan dapat dihindari sebelum waktunya.

### 2.3 Klasifikasi Kestabilan

Berdasarkan sifat fisik dari fenomena, stabilitas sistem tenaga dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu, berdasarkan referensi [7]:

- 1) Kestabilan Frekuensi
- 2) Kestabilan Tegangan
- 3) Kestabilan Sudut Rotor

Permasalahan kestabilan sebenarnya merupakan suatu permasalahan umum, namun adanya variasi ketidakstabilan sistem mengakibatkan permasalahan kestabilan menjadi lebih kompleks. Oleh karena itu perlu adanya klasifikasi berkaitan dengan penyelesaian sistem sesuai dengan representasi/analisis yang tepat. Pada Gambar 2.3 dijelaskan mengenai klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik berdasarkan gangguan-gangguan yang mungkin terjadi.



**Gambar 2.3** Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik

Analisis stabilitas transien termasuk dalam mengidentifikasi faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan dan merancang metode untuk meningkatkan operasi yang stabil yang mana sangat dipengaruhi oleh klasifikasi stabilitas dalam kategori yang tepat.

Pembagian/klasifikasi kestabilan tersebut didasarkan pada beberapa pertimbangan, antara lain, berdasarkan referensi [7]:

- 1) Parameter yang berpengaruh terhadap kestabilan
- 2) Besar/kecilnya gangguan
- 3) Pertimbangan waktu sebagai parameter kestabilan sistem

### **2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor (*Rotor Angle Stability*)**

Stabilitas sudut rotor mengacu pada kemampuan mesin sinkron yang saling berhubungan/terinterkoneksi untuk tetap berada pada kondisi sinkron setelah mengalami gangguan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik setiap mesin sinkron dalam sistem tersebut. Ketidakstabilan ini dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan ayunan sudut beberapa generator sehingga menyebabkan hilangnya sinkronisasi generator satu dengan generator lain. Berdasarkan karakteristik rotornya, kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua, yaitu, berdasarkan referensi [8]:

#### **2.3.1.1 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Kecil (*Small-Disturbance Angle Stability*)**

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan sinkron ketika sistem mengalami gangguan kecil. Studi stabilitas transien gangguan kecil ini umumnya terjadi pada rentang waktu 10-20 detik setelah adanya gangguan dan tergantung pada operasi awalnya. Pada keadaan ini, daya *output* generator akan berubah-ubah sesuai dengan perubahan besarnya sudut rotor.

#### **2.3.1.2 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Besar (*Large-Disturbance Angle Stability/Transient Stability*)**

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kestabilan berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan sinkron saat mengalami gangguan. Gangguan besar yang dapat terjadi seperti hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya pembangkit dapat mengganggu kerja sistem kelistrikan industri. Respon sudut generator mengalami penyimpangan dan dipengaruhi oleh ketidaklinieran hubungan sudut daya sehingga sistem mengalami "*loss of synchronization*" yang mengakibatkan ketidakstabilan ayunan pertama. Studi stabilitas transien pada keadaan ini terjadi dalam rentang



waktu yang singkat yaitu antara 3–5 detik setelah adanya gangguan secara tiba-tiba. Pada sistem kelistrikan yang lebih luas, rentang waktu dapat berkisar antara 10–20 detik setelah gangguan. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil dan kestabilan transien tergolong fenomena kestabilan jangka pendek (*short term*).

### **2.3.2 Kestabilan Frekuensi (*Frequency Stability*)**

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan nilai frekuensi nominal agar tetap stabil mengikuti perubahan sistem yang berubah secara tiba-tiba akibat ketidakseimbangan pasokan daya pembangkit dengan daya yang diserap beban. Perputaran turbin sangat erat kaitannya dengan frekuensi sistem tenaga listrik. Apabila turbin berputar melebihi putaran nominalnya, maka torsi putar yang dihasilkan juga semakin besar sehingga frekuensi akan naik dan mampu menimbulkan potensi kerusakan pada pembangkit hingga ke jaringan-jaringan transmisi dan distribusi khususnya industri, berdasarkan referensi [8].

### **2.3.3 Kestabilan Tegangan (*Voltage Stability*)**

Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan pada kondisi stabil pada semua bus dalam sistem tenaga listrik setelah terjadi gangguan dari kondisi operasi awal yang diberikan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara permintaan beban dan suplai beban dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan frekuensi dapat mengakibatkan terjadinya penurunan atau naiknya tegangan dari beberapa bus. Ketidakstabilan tegangan dapat dipengaruhi karena hilangnya beban pada sistem, hubung singkat saluran transmisi, dan pemadaman secara tiba-tiba. Penurunan secara bertahap dalam tegangan bus juga dapat dikaitkan dengan ketidakstabilan sudut rotor.

Faktor utama yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan tegangan adalah adanya *drop* tegangan yang terjadi pada aliran daya aktif dan reaktif melalui reaktansi induktif jaringan transmisi. Hal ini dapat membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mengalirkan daya dan mengurangi besar tegangan. Penyaluran daya dibatasi ketika generator menyentuh batas beban lebih arus jangkar. Stabilitas tegangan dapat terancam ketika gangguan meningkatkan daya reaktif permintaan listrik melebihi kapasitas sumber daya reaktif yang tersedia. Kestabilan



tegangan dibagi menjadi dua kategori untuk memudahkan identifikasi permasalahan, yaitu, berdasarkan referensi [8]:

#### **2.3.3.1 Kestabilan Tegangan Gangguan Kecil (*Small-Disturbance Voltage Stability*)**

Kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada kondisi stabil akibat gangguan kecil seperti perubahan beban yang tidak menentu. Analisis kestabilan tegangan gangguan kecil menggunakan teknik linear dapat memberikan informasi kestabilan tegangan yang terkait berdasarkan kondisi yang ada sehingga penyebab dan lokasi potensi gangguan dapat ditentukan. Gangguan tegangan kecil dipengaruhi oleh karakteristik beban hingga pengontrolan secara terus-menerus pada sistem tenaga. Konsep ini berguna dalam menentukan bagaimana tegangan merespon perubahan beban-beban kecil.

#### **2.3.3.2 Kestabilan Tegangan Gangguan Besar (*Large-Disturbance Voltage Stability*)**

Kemampuan untuk mempertahankan tegangan stabil yang diakibatkan adanya gangguan besar seperti kesalahan sistem, lepasnya generator, dan hubung singkat. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik sistem dan beban, dan interaksi keduanya. Evaluasi stabilitas biasanya membutuhkan pengujian respon tidak linier (kinerja dinamis) dari sistem tenaga listrik selama periode waktu yang cukup untuk mengamati interaksi peralatan seperti *tap changer* transformator dan arus medan pada generator.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kestabilan merupakan suatu permasalahan, namun untuk mengidentifikasi lebih rinci mengenai permasalahan yang terjadi dibutuhkan klasifikasi. Klasifikasi kestabilan tegangan berdasarkan waktunya dapat dibagi menjadi 2, yaitu, berdasarkan referensi [8]:

##### **2.3.3.2.1 Kestabilan Tegangan Jangka Pendek (*Short Term Voltage Stability*)**

Gangguan kestabilan jangka pendek dapat mengakibatkan adanya kedip tegangan (*voltage sags*) hingga kenaikan tegangan (*swells*) pada sistem tenaga listrik, berdasarkan referensi [8].

###### **1) Kedip Tegangan (*Voltage Sag*)**

Kedip tegangan menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai

variasi tegangan rms dengan rentang besar tegangan antara 90% sampai 10% dari tegangan nominal dan berlangsung selama 0,5 *cycle* sampai 1 menit. Kedip tegangan dapat diakibatkan oleh kesalahan sistem awal, namun kasus ini juga dapat disebabkan oleh *switching* beban kapasitas besar atau *starting motor* dengan daya besar seperti motor induksi yang membutuhkan arus *start* sekitar 6–10 kali arus nominal. Kedip tegangan yang berkelanjutan tentu dapat mengakibatkan gangguan proses pada peralatan sistem tenaga sehingga permasalahan ini harus dapat diatasi dengan baik untuk menunjang keandalan sistem tenaga.

## 2) Kenaikan Tegangan (*Voltage Swell*)

Kenaikan tegangan menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai peningkatan tegangan rms atau arus pada frekuensi daya untuk jangka waktu 0,5 *cycle* selama 1 menit. Sama seperti kedip tegangan yang mana dapat disebabkan karena adanya kesalahan sistem awal, namun kasus ini lebih jarang ditemukan pada sistem tenaga listrik. Kenaikan tegangan ini dapat terjadi akibat kegagalan saluran satu fasa ke tanah sehingga sistem mengalami tegangan lebih sementara pada fase yang gagal tersebut. Penyebab lainnya adalah adanya *switching* beban yang cukup besar atau *switching* kapasitor *bank*. Dampak yang berpotensi timbul akibat peningkatan tegangan secara umum adalah terjadinya kegagalan komponen.

### 2.3.3.2.2 Kestabilan Tegangan Jangka Lama (*Long Term Voltage Stability*)

Gangguan kestabilan jangka lama menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai cakupan penyimpangan/deviasi rms pada sistem tenaga selama lebih dari 1 menit. Kasus ini dapat mengakibatkan adanya tegangan lebih (*over voltage*) dan tegangan kurang (*under voltage*) pada sistem tenaga listrik tergantung pada penyebab terjadinya, berdasarkan referensi [8]:

### 1) Tegangan Lebih (*Over Voltage*)

Merupakan peningkatan nilai tegangan rms sebesar lebih dari atau sama dengan 110% (110% - 120%) selama lebih dari 1 menit. Tegangan lebih umumnya dihasilkan akibat adanya *switching* peralatan seperti pelepasan beban dengan kapasitas daya yang besar, *switching* kapasitor *bank*, dan sebagainya. Faktor lain penyebab tegangan lebih yaitu tegangan sistem yang buruk, pengaturan tegangan yang buruk seperti adanya kemungkinan kesalahan pengaturan *tap* transformator sehingga mengakibatkan kenaikan tegangan.

Akibat dari tegangan lebih tentu berdampak pada peralatan sistem tenaga listrik. Jika pada perangkat elektronik, maka kondisi ini dapat menyebabkan perangkat rusak. Berbeda dengan peralatan sistem tenaga seperti transformator, kabel, bus, *switchgear*, CT, dan PT umumnya tidak mengalami kegagalan seketika. Namun, keadaan tegangan lebih yang berkelanjutan berpotensi mengurangi umur peralatan tersebut. Bahkan apabila terdapat relay pada sebuah sistem, maka operasi yang tidak sesuai rencana dapat saja terjadi.

### 2) Tegangan Kurang (*Under Voltage*)

Merupakan penurunan nilai tegangan rms sebesar kurang dari atau sama dengan 90% (90% - 80%) selama lebih dari 1 menit. Penyebab *under voltage* merupakan kebalikan dari adanya *over voltage* seperti penambahan beban dengan daya yang besar, penyalan *switching* kapasitor *bank*, dan sebagainya. Berkurangnya besar tegangan juga memiliki dampak terhadap kinerja sistem tenaga listrik. Keadaan ini dapat berpengaruh pada peralatan seperti kontroler motor yang mana secara umum tegangan *drop* yang diizinkan adalah sebesar 70 – 80% dari tegangan nominal. Dampak nyata akibat keadaan ini ialah peningkatan lonjakan arus pada motor yang mengakibatkan tingginya rugi panas, perubahan kecepatan motor induksi, dan sebagainya.



## 2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan (*Rotor Dynamics and The Swing Equation*)

Persamaan yang mengatur gerakan (putaran) rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil kali dari momen kelambaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Untuk generator sinkron, persamaan ayunan dapat ditulis sebagai berikut, berdasarkan referensi [9]:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

dimana:

$J$  = Momen inersia/kelembaman total dari massa rotor ( $\text{Kg.m}^2$ )

$\theta_m$  = Sudut pergeseran (*angular displacement*) rotor terhadap suatu sumbu yang diam (rad)

$t$  = Waktu (dalam detik)

$T_m$  = Momen putar poros yang disuplai dari *prime mover* dengan mempertimbangkan reduksi torsi akibat rugi putaran (Nm)

$T_e$  = Momen putar elektromagnetik (Nm)

$T_a$  = Momen putar percepatan bersih (Nm)

Momen putar mekanis  $T_m$  dan momen putar elektrik  $T_e$  dianggap positif untuk generator serempak. Ini berarti bahwa  $T_m$  adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran  $\theta_m$  yang positif.

Untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap,  $T_m$  dan  $T_e$  adalah sama sedangkan momen putar  $T_a$  sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan serempak dengan mesin lainnya yang bekerja pada kecepatan serempak dalam sistem daya tersebut. Penggerak mulanya mungkin berupa suatu turbin air atau turbin uap dan untuk masing-masing turbin sudah ada model dengan bermacam-macam tingkat kesulitan untuk melukiskan pengaruh pada  $T_m$ .

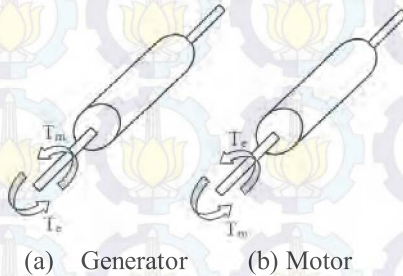
Jika generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron  $\omega_{sm}$  maka:



$$T_m = T_e \quad (2.2)$$

Jika terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan ( $T_m > T_e$ ) atau perlambatan ( $T_m < T_e$ ) seperti yang terdapat pada Gambar 2.4 dimana:

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$



**Gambar 2.4** Representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektris (a) Generator (b) Motor

Pada persamaan (2.1) karena  $\theta_m$  diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.4)$$

Dengan  $\theta_m$  adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.4) terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.5)$$

Dimana percepatan rotornya adalah

$$\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (2.6)$$

Substitusi persamaan (2.6) ke persamaan (2.1), sehingga:

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.7)$$

Kemudian dengan mengalikan persamaan (2.7) dengan  $\omega_m$  maka didapat:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.8)$$

Jika kecepatan putar dikali torsi adalah sama dengan daya, maka persamaan (2.8) dapat ditulis dengan persamaan daya sebagai berikut:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

Dimana  $J \omega_m$  adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor yang dinyatakan dengan M. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut:

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2 \quad (2.10)$$

atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) lebih sesuai untuk menuliskan persamaan ayunan dengan parameter sudut daya listrik  $\delta$ . Jika p adalah jumlah kutub generator sinkron, maka sudut daya listrik  $\delta$  dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik  $\delta_m$  adalah

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad \text{dan} \quad \omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.12)$$

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya listrik adalah

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

Bila nilai  $M$  pada persamaan (2.11) disubstitusikan kedalam persamaan (2.13) dan dibagi dengan daya dasar  $S_B$ , akan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{2}{p} \times \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.14)$$

Terdapat suatu besaran yang dikenal sebagai konstanta  $H$ . Konstanta  $H$  didefinisikan sebagai energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi rating mesin (MVA) yang dituliskan seperti persamaan berikut:

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.15)$$

Substitusi persamaan (2.15) ke persamaan (2.14) maka didapatkan:

$$\frac{2}{p} \times \frac{2H}{\omega_{sm}} \times \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_{m(p.u)} - P_{e(p.u)} \quad (2.16)$$

dimana:

$P_{m(p.u)}$  = daya mekanik dalam satuan p.u

$P_{e(p.u)}$  = daya listrik dalam satuan p.u

Kecepatan putar listrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik dengan  $\omega_{sm} = \frac{2}{p} \omega_s$  sehingga persamaan (2.16) menjadi:

$$\frac{2H}{\omega_s} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(p.u)} - P_{e(p.u)} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) sering diekspresikan dalam bentuk frekuensi  $f_0$  dan subskrip per unit dihilangkan sehingga daya dinyatakan dalam satuan per unit dari persamaan (2.17) adalah

$$\frac{H}{\pi f_0} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Dengan  $\delta$  dalam radian. Jika  $\delta$  dinyatakan dalam derajat, maka persamaan ayunan menjadi:

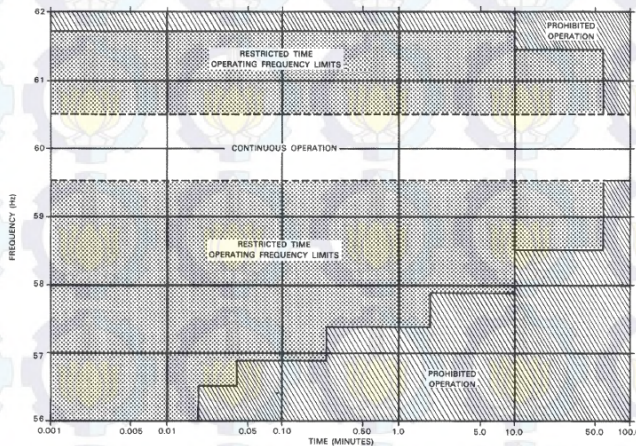
$$\frac{H}{180f_0} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.18)$$

## 2.5 Standar Kestabilan Transien

Dalam penerapannya, kestabilan transien disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak/*software* untuk mengetahui keadaan sistem sesaat setelah terjadi gangguan. Aturan mengenai kestabilan transien menggunakan standar internasional sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk analisis sistem tenaga listrik.

### 2.5.1 Standar Kemampuan Frekuensi Abnormal Turbin

Setiap produsen mampu memberikan karakteristik operasi normal terhadap peralatan yang dibuatnya. Pada turbin uap misalnya, produsen umumnya memiliki data berupa batas kemampuan turbin ketika beroperasi. Batasan ini digunakan sebagai antisipasi perlindungan peralatan sehingga resiko kerusakan dapat dihindari. Gambar 2.5 merupakan standar kemampuan frekuensi abnormal pada turbin uap, berdasarkan referensi [8].



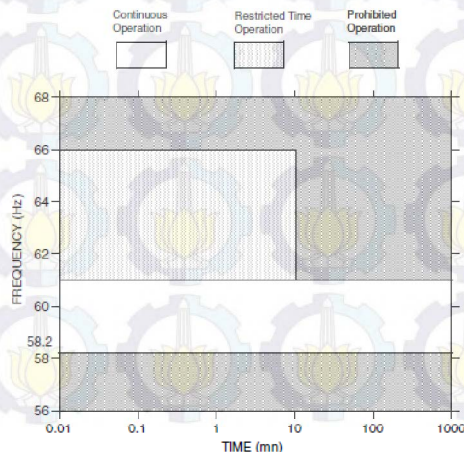
**Gambar 2.5** Standar batas operasi turbin uap (*Over/Under Frequency*)

Pada gambar tersebut, batas frekuensi antara 59,5 Hz – 60,5 Hz merupakan batas normal operasi turbin uap. Sedangkan batas frekuensi diatas 60,5 Hz dan dibawah 59,5 Hz adalah batas larangan turbin uap



beroperasi. Batas frekuensi yang telah disebutkan sebelumnya merupakan batas frekuensi standar 60 Hz. Jika dikonversi menjadi standar 50 Hz maka 59,5 Hz akan menjadi 49,58 Hz atau sekitar 99,16%. Sedangkan 60 Hz menjadi 50,42 Hz atau sekitar 100,83 Hz. Berdasarkan standar, kejadian *under frequency* dapat mengakibatkan berkurangnya umur sebuah peralatan. *Under frequency* yang pertama pada turbin uap mampu menyebabkan kecepatan putar turbin melemah dan mengurangi siklus kegagalan pada waktu berikutnya. Jika sebuah unit mampu beroperasi pada frekuensi tertentu selama 1 menit, maka unit tersebut diperbolehkan tetap beroperasi selama 9 menit berikutnya pada frekuensi yang sama hingga melebihi batas umur *blades*.

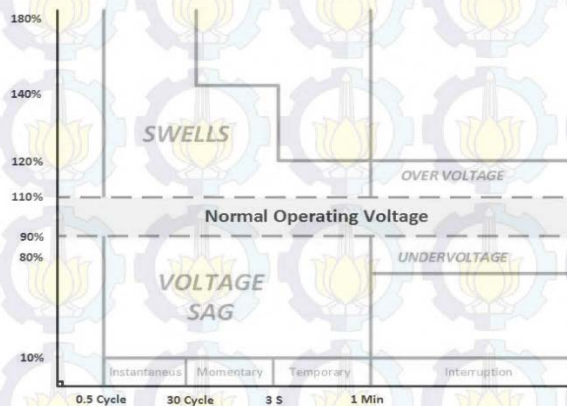
Standar operasi batas frekuensi dapat berbeda sesuai dengan karakteristik pembangkit yang digunakan. Turbin pembakaran/gas turbin berbeda dengan turbin uap terutama pada media yang digunakan untuk menggerakkan turbin, yaitu adanya proses kompresi udara dan pencampuran dengan bahan bakar sehingga menghasilkan gas buang panas. Gas ini disalurkan menuju turbin yang telah terpasang pada poros. Poros inilah yang berputar untuk menggerakkan generator. Penerapan batas frekuensi bawah memiliki kesamaan dengan penerapan batas frekuensi bawah pada turbin uap. Namun, terdapat perbedaan pada desain turbin serta adanya pembakaran yang mengakibatkan persyaratan perlindungan juga berbeda. Pada Gambar 2.6 berikut ini merupakan standar batas operasi pada gas turbin.



**Gambar 2.6** Standar batas operasi gas turbin (*Over/Under Frequency*)

### 2.5.2 Standar Batas Operasi Tegangan

Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai penyedia listrik di Indonesia, memiliki standar mengenai batas tegangan operasi yang harus dipenuhi untuk penggunaan di industri. Secara umum proses penyaluran daya sistem tenaga listrik dilakukan melalui jarak yang cukup jauh sehingga potensi adanya *drop* tegangan dan rugi-rugi transmisi tidak dapat diabaikan. Pada Gambar 2.7 berikut ini merupakan batas operasi normal tegangan pada kondisi transien hingga *steady state*.



**Gambar 2.7** Standar batas operasi tegangan kestabilan transien

Standar tegangan nominal dalam kondisi normal yang diperbolehkan oleh PLN yaitu:

- 500 kV + 5%, -5%
- 150 kV + 5%, -10%
- 70 kV + 5%, -10%
- 20 kV + 5%, -10%

### 2.5.3 Standar Pelepasan Beban (*Load Shedding*)

Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, terdapat 2 skema pelepasan beban ketika terjadi gangguan antara lain adalah pelepasan beban 3 langkah dan pelepasan beban 6 langkah. Tabel 2.1 dan 2.2 berikut adalah pelepasan beban 3 langkah dan pelepasan beban 6 langkah (60 Hz) dan Tabel. 2.3 dan 2.4 berikut adalah pelepasan beban 3 langkah dan pelepasan beban 6 langkah (50 Hz), berdasarkan referensi [8].

**Tabel 2.1** Standar pelepasan beban 3 langkah (60Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	59,3	10	6
2	58,9	15	6
3	58,5	<i>As required to arrest decline before 58,2 Hz</i>	

**Tabel 2.2** Standar pelepasan beban 6 langkah (60Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	59,5	10	6
2	59,2	10	6
3	58,8	5	6
4	58,8	5	14
5	58,4	5	14
6	58,4	5	21

**Tabel 2.3** Standar pelepasan beban 3 langkah (50Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent %</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	49,42	98,84%	10	6
2	49,08	98,16%	15	6
3	48,75	97,5%	<i>As required to arrest decline before 48,5 Hz</i>	

**Tabel 2.4** Standar pelepasan beban 6 langkah (50Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent %</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (Cycles) on Relay</i>
1	49,58	99,16%	10	6
2	49,33	98,66%	10	6
3	49	98%	5	6
4	49	98%	5	14
5	48,67	97,34%	5	14
6	48,67	97,34%	5	21





## BAB III

### SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

#### 3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik

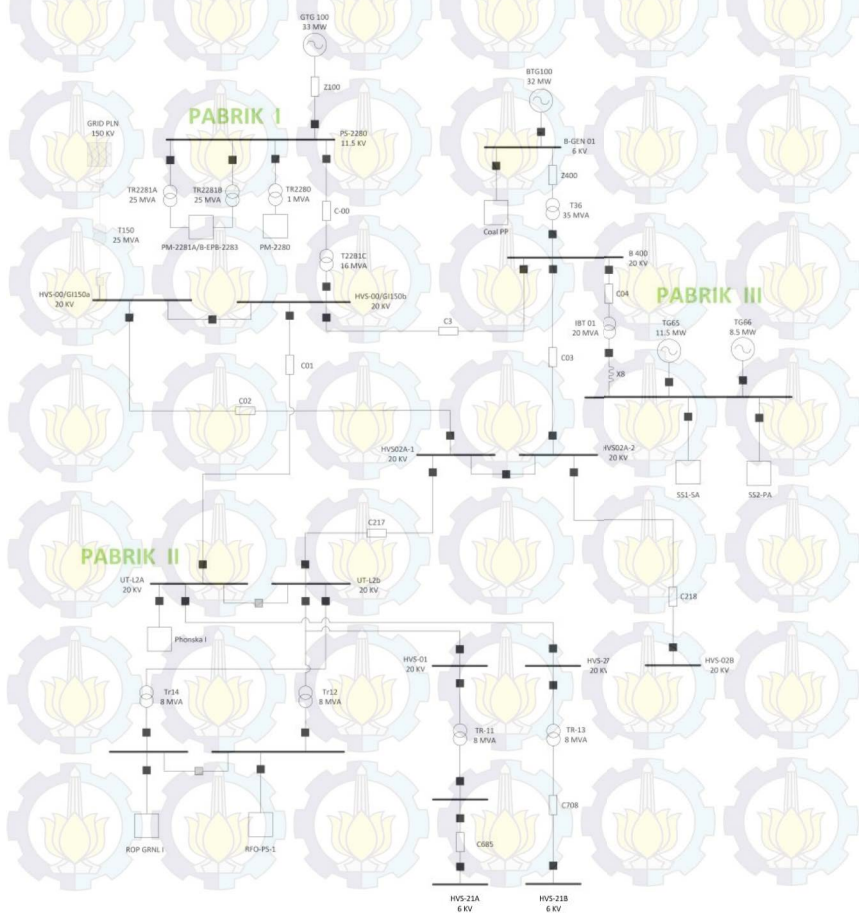
PT. Petrokimia Gresik merupakan salah satu pabrik pupuk terbesar di Indonesia. Untuk menunjang kegiatan operasional di PT. Petrokimia Gresik, maka diperlukan pembangkit listrik yang cukup untuk melayani kebutuhan daya beban selama proses produksi. Oleh karena itu, PT. Petrokimia Gresik mengoperasikan *Gas Turbine Generator (GTG Plant-I)* dengan daya sebesar 1x33 MW, *Steam Turbine Generator (STG Plant-III)* 1x11,5 MW dan 1x8,5 MW serta Daya dari PLN. Pada tahun 2010, PT. Petrokimia Gresik berupaya meningkatkan keandalan dengan menambahkan satu unit pembangkit *Steam Turbine Generator (STG UBB Plant)* sebesar 1x32 MW untuk meningkatkan keandalan dan *spinning reserve*. Unit-unit pembangkit tersebut akan diintegrasikan langsung ke sistem tegangan 20 KV.

PT. Petrokimia Gresik memiliki sistem kelistrikan yang di-suplai oleh beberapa Generator dan UBB (Utilitas Batu Bara). Selain itu, beberapa generator yang dioperasikan juga akan diintegrasikan dengan *grid* PLN sebagai cadangan. Namun, pada Tugas Akhir ini diasumsikan bahwa PT. Petrokimia beroperasi dalam keadaan suplai dari PLN *OFF*. Berikut pada Tabel 3.1 adalah data daya generator yang digunakan PT. Petrokimia Gresik:

**Tabel 3.1** Data spesifikasi generator di PT. Petrokimia Gresik

No.	Spesifikasi	Generator ID				
		GTG 100	BTG100	TG 65	TG 66	DE – 2283
1.	Rating Daya (MW)	33	32	11,5	8,5	0,9
2.	Tegangan (kV)	11,5	6	6	6	0,38
3.	Kutub	4	2	4	4	4
4.	Faktor Daya	80%	80%	80%	80%	85%
5.	Tipe <i>Exciter</i>	DC1	ST1	ST1	ST1	-
6.	Tipe Governor	GT	ST	2301	2301	-
7.	Mode	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>

Sistem integrasi kelistrikan sebesar 20 KV pada PT. Petrokimia bertujuan untuk perencanaan pengembangan lokasi serta pabrik menjadi lebih luas sehingga permintaan produksi dapat terpenuhi dengan baik serta mampu memberi keuntungan dalam segi ekonomi. Pada Tugas Akhir ini, sistem integrasi 20 KV akan dihubungkan membentuk jaringan sistem distribusi ring dengan rating tegangan 20 KV. Berikut pada Gambar 3.1 merupakan sistem kelistrikan yang ada di PT. Petrokimia Gresik.



**Gambar 3.1** Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

Penyaluran daya listrik pada sistem distribusi di PT. Petrokimia menggunakan beberapa trafo *step up* maupun *step down*. Berikut pada Tabel 3.2 adalah data spesifikasi generator di PT. Petrokimia Gresik.

**Tabel 3.2** Data spesifikasi trafo di PT. Petrokimia Gresik

No.	Trafo ID	MVA	kV	%Z	X/R	Hubungan
1.	TR2281A	25	11,5/6	10	23,7	Delta/Wye
2.	TR2281B	25	11,5/6	10	23,7	Delta/Wye
3.	TR2280	1	11,5/0.38	10	5,79	Delta/Wye
4.	T2281C	16	11,5/20	10	18,6	Delta/Wye
5.	T36	35	6/20	12,5	27,3	Delta/Wye
6.	IBT 01	20	20/6	10,5	18,6	Wye/Delta
7.	Tr14	8	20/6	8,35	14,23	Delta/Wye
8.	Tr12	8	20/6	10	14,23	Delta/Wye
9.	TR-11	8	20/6	8,35	14,23	Delta/Wye
10.	TR-13	8	20/6	10	14,23	Delta/Wye

Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik menggunakan sistem interkoneksi dan sistem distribusi ring dengan menggunakan 4 generator utama dan 1 generator cadangan (*emergency*). Seluruh generator yang beroperasi mampu menghasilkan daya sebesar 53,9 MW pada beban yang ada di PT. Petrokimia Gresik dengan rincian generator GTG 100 mampu menghasilkan daya sebesar 20,7 MW, generator BTG100 menghasilkan daya sebesar 16,2 MW, generator TG65 menghasilkan daya sebesar 10 MW, dan generator TG66 menghasilkan daya sebesar 7 MW dengan rating tegangan yang berbeda-beda.

Generator GTG 100 beroperasi pada tegangan 11,5 kV di bus PS-2280. Untuk mengubah rating tegangan menjadi 20 kV, maka bus dihubungkan dengan trafo *step up* dengan kapasitas trafo 16 MVA yang memiliki ID T2281C dan terhubung pada bus HVS-00/GI150b. Generator BTG100 terhubung dengan bus B-GEN 01 dengan rating tegangan 6 kV. Bus tersebut kemudian dihubungkan dengan trafo T36 untuk dinaikkan tegangannya menggunakan trafo *step up* menjadi 20 kV yang terhubung pada bus B 400.

Sistem kelistrikan hubungan ring pada PT. Petrokimia terhubung pada bus HVS-00/GI150a, HVS-00/GI150b, B 400, HVS02A-2, HVS02A-1. Sistem tersebut terhubung pada bus yang sama yaitu dengan



rating tegangan 20 kV. Pemilihan sistem distribusi secara interkoneksi dan ring bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem. Pada produksi pupuk dan non-pupuk, PT. Petrokimia Gresik mengoperasikan Pabrik I yang mana pada Pabrik tersebut diproduksi bahan-bahan utama serta bahan-bahan pendukung produksi di Pabrik II serta Pabrik III seperti Amoniak ( $\text{NH}_3$ ),  $\text{CO}_2$  cair,  $\text{CO}_2$  padat, gas nitrogen, nitrogen cair, dan gas oksigen, oksigen cair. Oleh karena itu, demi keberlangsungan produksi yang baik maka unit produksi Pabrik I harus selalu dalam kondisi aktif / ON.

### 3.2 Motor Induksi MC-1301 (4000 kW) di PT. Petrokimia Gresik

Proses produksi pupuk maupun non-pupuk di Pabrik III, banyak digunakan motor – motor listrik sebagai alat produksinya. Salah satu motor tegangan menengah yang digunakan yaitu motor dengan *equipment id* MC-1301 (4000 kW). Di Pabrik III, MC-1301 merupakan *air blower* yang berfungsi untuk pembakaran (pemanasan) sulfur di tabung pembakaran. Sebelumnya, tabung pembakaran terlebih dahulu akan dipanaskan menggunakan bahan bakar solar hingga mencapai keadaan panas sekitar  $1000^0\text{ C}$ . Setelah itu sulfur akan dipompa menuju tabung dan disemprot menggunakan udara bertekanan oleh MC-1031 sehingga sulfur menjadi butiran-butiran cairan. Butiran cairan tersebut akan mengalami reaksi dengan suhu tinggi tabung hingga akhirnya menjadi gas  $\text{SO}_2$ . Berikut pada Tabel 3.3 merupakan motor-motor tegangan menengah (6 kV) yang ada di Pabrik III, PT. Petrokimia Gresik.

**Tabel 3.3** Data motor tegangan menengah (6 kV) di Pabrik III, PT. Petrokimia Gresik

No.	Motor ID	Power Rating (kW)	Voltage Rating (kV)	Apparent Power (kVA)	RPM	Poles
1.	MC-1301	4000	6	4510	1500	4
2.	MC1302	1000	6	1131	1500	4
3.	MP1101A	275	6	312	1500	4
4.	MP1302	170	6	196	1500	4
5.	MC2323	300	6	342	1500	4
6.	MC2341	160	6	193	1500	4

**Lanjutan Tabel 3.3**

<b>No.</b>	<b>Motor ID</b>	<b>Power Rating (kW)</b>	<b>Voltage Rating (kV)</b>	<b>Apparent Power (kVA)</b>	<b>RPM</b>	<b>Poles</b>
7.	MM2302A	400	6	453	1500	4
8.	MP2601A	150	6	244	1500	4
9.	MP2601C	150	6	244	1500	4
10.	MP2602A	150	6	244	1500	4
11.	MP2602C	150	6	244	1500	4
12.	MQ2204	310	6	351	1500	4
13.	MQ7131-1	220	6	358	1500	4
14.	MC4202	400	6	437	1500	4
15.	MC4203	800	6	874	1500	4
16.	MC5101	200	6	219	1500	4
17.	MC5302A	210	6	230	1500	4
18.	MC5302B	210	6	230	1500	4
19.	MC5603	230	6	251	1500	4
20.	MP6521A	480	6	525	1500	4
21.	MP6521B	480	6	525	1500	4
22.	MP6531A	480	6	525	1500	4
23.	MP6531B	480	6	525	1500	4
24.	MP6201	160	6	175	1500	4
25.	MP6202A	170	6	186	1500	4
26.	M6202B	170	6	186	1500	4



## **BAB IV**

### **SIMULASI & ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK**

#### **4.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik**

*Single Line Diagram* PT. Petrokimia Gresik dimodelkan melalui *software* ETAP 12.6 dengan menggunakan data-data *existing* yang digunakan di PT. Petrokimia Gresik. Kemudian, simulasi akan dilakukan berkaitan dengan analisis kestabilan sistem ketika mengalami gangguan-gangguan besar seperti generator lepas (*generator outage*), *starting motor*, dan gangguan hubung singkat (*short circuit*).

Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik secara umum menggunakan sistem interkoneksi. Sistem ini digunakan untuk meningkatkan keandalan sistem ketika sistem mengalami gangguan. Keunggulan dari sistem interkoneksi ini adalah beberapa pusat pembangkit dapat menyalurkan daya ke beban sehingga memungkinkan beban mendapat suplai lebih dari 1 generator. Pada Tugas Akhir ini, sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dikembangkan dengan menggunakan sistem distribusi ring sehingga diharapkan keandalan sistem semakin meningkat ketika sistem mengalami gangguan besar secara tiba-tiba.

PT. Petrokimia Gresik memiliki beberapa bus utama yang akan diintegrasikan ke sistem interkoneksi dan ring dengan rating 20 kV. Bus tersebut antara lain adalah bus dengan ID HVS-00/GI150a, HVS-00/GI150b, B 400, HVS02A-2, dan HVS02A-1. Untuk menyalurkan ke beban, digunakan trafo *step down* sehingga tegangan turun menjadi 6 kV dan 0,38 kV. Tegangan tersebut kemudian digunakan untuk motor tegangan menengah, motor tegangan rendah, serta beban lampu (*lump load*), dan sebagainya.

#### **4.2 Perencanaan Studi Kasus PT. Petrokimia Gresik**

Pengujian sistem terhadap gangguan berfungsi untuk mengetahui respon sistem terhadap gangguan-gangguan yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis sistem dengan cara memberikan gangguan pada sistem kelistrikan. Gangguan-gangguan yang akan dilakukan antara lain adalah gangguan generator lepas, *starting motor*, dan hubung singkat.

Studi kasus yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini secara umum adalah sebagai berikut:



## 1. Generator Lepas/*Generator Outage*

Pada kasus generator lepas, pada sistem PT. Petrokimia diasumsikan terdapat 1 hingga 2 generator lepas dari sistem kelistrikan ketika sistem sedang berjalan dengan asumsi bahwa pembangkit PLN *OFF*. Setelah itu respon transien sistem akan dipantau untuk mengetahui apakah sistem berjalan sesuai dengan standar yang telah ada. Respon sistem yang akan dipantau antara lain adalah respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sesaat setelah sistem mengalami gangguan.

## 2. *Starting Motor*

Pada kasus ini dilakukan *starting motor* ketika motor berada dalam kondisi *OFF* dengan asumsi 1 motor beroperasi sesaat setelah sistem berjalan. Motor yang di-*start* adalah motor induksi yang memiliki daya paling besar pada sistem yaitu motor dengan ID MC-1301 (4000 kW). Motor induksi kemudian akan dioperasikan sesaat setelah sistem berjalan yaitu 1 detik setelah sistem mulai beroperasi. Setelah itu akan dilihat respon transien sistem ketika motor *start* diantaranya yaitu respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor.

## 3. *Hubung Singkat/Short Circuit*

Pada kasus *hubung singkat*, diasumsikan salah satu bus mengalami gangguan *hubung singkat* tiga fasa. Gangguan *hubung singkat* akan mempengaruhi kestabilan sistem secara umum. Oleh karena itu, pada kasus ini juga dipantau respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sesaat setelah sistem mengalami gangguan *hubung singkat*. Salah satu langkah untuk melindungi sistem sehingga sistem masih dapat bertahan pada standar kestabilannya yaitu dengan menggunakan metode pelepasan beban/*load shedding* yang mengacu pada standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

Berikut ini pada Tabel 4.1 merupakan studi kasus yang akan dilakukan pada *plant* PT. Petrokimia Gresik. Pada Tabel 4.1 juga dijelaskan mengenai keterangan ketika gangguan-gangguan sistem terjadi antara lain keterangan ID peralatan yang mengalami gangguan serta respon *circuit breaker* (CB) ketika sistem mengalami gangguan.

**Tabel 4.1** Studi kasus sistem pada PT. Petrokimia Gresik

No.	Studi Kasus	Keterangan
1.	1Gen. <i>OFF</i>	Generator TG65 lepas dari sistem.
2.	1Gen. <i>OFF</i> + <i>Load shedding</i> (LS1)	Generator TG65 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan pelepasan beban 1.
3.	2Gen. <i>OFF</i>	Generator TG65 & TG66 lepas dari sistem.
4.	2Gen. <i>OFF</i> + <i>Load shedding</i> 1 (LS1)	Generator TG65 & TG66 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan pelepasan beban (1 langkah).
5.	2Gen. <i>OFF</i> + <i>Load shedding</i> 2 (LS2)	Generator TG65 & TG66 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan pelepasan beban (2 langkah).
6.	1 Motor <i>Start</i> (MS1)	Motor ID MC-1301 (4000 kW) pada bus SS#1-SA <i>start</i> saat 1 detik setelah sistem berjalan.
7.	Hubung Singkat 1 / <i>Short Circuit</i> 1 (SC1)	Gangguan hubung singkat 1 pada bus HVS 65 (6 kV) kemudian dilanjutkan dengan CB CB 01-HVS-02 2 <i>open</i> 0,3 detik setelah terjadi gangguan.
8.	Hubung Singkat 2 / <i>Short Circuit</i> 2 (SC2)	Gangguan hubung singkat 2 pada bus HVS-27 (20 kV) kemudian dilanjutkan dengan CB 02CB33 <i>open</i> 0,3 detik setelah terjadi gangguan.

Berdasarkan Tabel 4.1 yang mana telah dijelaskan secara rinci mengenai kasus gangguan yang akan dilakukan, diperlukan indikator kestabilan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, pada kasus generator lepas dan hubung singkat, bus referensi yang digunakan sebagai indikator kestabilan sistem yaitu bus ID B 400 yang mewakili bus dengan rating tegangan 20 kV, bus PS-2280 yang mewakili rating tegangan 11,5 kV, dan bus HVS 65 yang mewakili rating tegangan 6

kV. Sedangkan, pada kasus *starting motor*, bus SS#1-SA (6 kV) digunakan sebagai bus referensi karena bus tersebut terhubung langsung dengan beban yang akan dijalankan. Selain itu, respon akibat *starting motor* akan dipantau juga pada bus utama seperti bus B 400 dan HVS 65. Pada studi kasus hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik, respon frekuensi dan tegangan yang akan diamati adalah bus yang terletak dekat dengan bus yang mengalami gangguan.

Langkah-langkah untuk mencapai kestabilan bergantung pada gangguan yang terjadi dengan memperhatikan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada bus dan generator yang digunakan sebagai referensi kestabilan sistem. Langkah-langkah tersebut antara lain adalah:

1. Mengamati respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem akibat terjadi gangguan besar secara tiba-tiba.
2. Menganalisis respon tersebut apakah sesuai standar yang diizinkan serta melihat apakah sistem kembali stabil setelah terjadi gangguan.
3. Apabila sistem yang mengalami gangguan mengakibatkan kondisi sistem menjadi tidak stabil (berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor) maka dilakukan pelepasan beban menggunakan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

### **4.3 Simulasi Kestabilan Transien**

Respon kestabilan suatu sistem dapat dimodelkan menggunakan *software* ETAP sehingga gangguan-gangguan yang mungkin terjadi di lapangan juga dapat dilakukan pemodelan sehingga pengujian kestabilan lebih mudah diterapkan. Simulasi kestabilan transien pada PT. Petrokimia Gresik dilakukan dengan membuat studi kasus antara lain lepasnya generator, *starting motor*, dan hubung singkat. Pengamatan kestabilan sistem diperoleh melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor generator sistem dengan membandingkan hasil respon tersebut terhadap standar ANSI/IEEE C37.106-1987 mengenai frekuensi abnormal turbin.

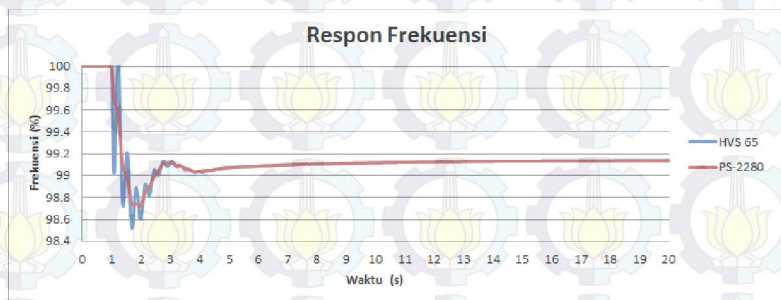
#### **4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas/Generator Outage**

Pada kasus generator lepas dari sistem kelistrikan, diasumsikan bahwa terdapat satu generator hingga dua generator *trip* secara tiba-tiba

setelah sistem beroperasi selama 1 detik. Generator yang diasumsikan trip adalah generator TG65 dan TG66 yang keduanya terhubung pada bus HVS 65 (6 kV). Kapasitas daya terpasang pada generator TG65 sebesar 11,5 MW sedangkan kapasitas daya terpasang pada generator TG66 adalah sebesar 8,5 MW.

#### 4.3.1.1 1Gen.OFF : 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ )

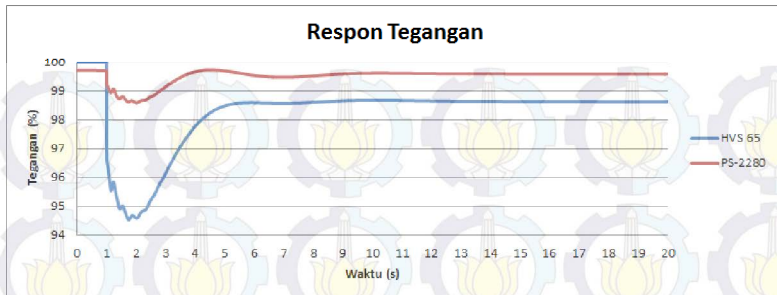
Pada kasus 1Gen.OFF ditunjukkan bahwa generator TG65 OFF ketika sistem berjalan selama 1 detik dengan asumsi semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati melalui simulasi transien pada *software* ETAP 12.6 pada bus PS-2280 (11,5 kV) dan bus HVS 65 (6 kV). Berikut pada Gambar 4.1 merupakan respon frekuensi ketika 1 generator lepas dari sistem.



**Gambar 4.1** Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem.

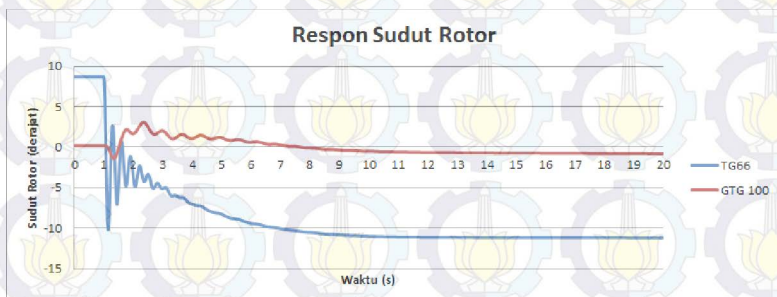
Pada Gambar 4.1 ditunjukkan bahwa sistem mengalami gangguan ketika sistem sedang berjalan selama 1 detik dengan lama simulasi transien adalah 20 detik. Respon frekuensi sistem mengalami penurunan frekuensi dengan nilai terendah yaitu sebesar 98,517% pada 1,681 detik. Penurunan frekuensi secara drastis ini diakibatkan oleh lepasnya generator pada sistem dengan daya suplai generator ke sistem sebesar 10 MW. Berdasarkan data di atas, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi maksimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan pelepasan beban untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.





**Gambar 4.2** Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.2 ditunjukkan bahwa ketika sistem sedang berjalan selama 1 detik, terjadi gangguan generator TG65 lepas dari sistem. Hal ini mengakibatkan tegangan sistem pada bus HVS 65 (6 kV) dan PS-2280 (11,5 kV) mengalami penurunan. Penurunan tegangan terendah terjadi pada bus yang terhubung dengan generator langsung. Penurunan besarnya tegangan ini terjadi hingga mencapai 94,5478% pada 1,751 detik. Respon turunnya tegangan ini diakibatkan oleh generator sistem yang lepas sehingga beban pada sistem berupaya memperoleh arus nominal beban sedangkan jumlah beban total yang harus ditanggung sistem adalah sama. Dengan jumlah daya yang tetap dan arus yang harus disuplai menuju beban sangat besar, maka tegangan sistem akan mengalami penurunan. Pada kondisi ini berdasarkan standar tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman sehingga sistem dapat beroperasi pada keadaan tegangan di atas.



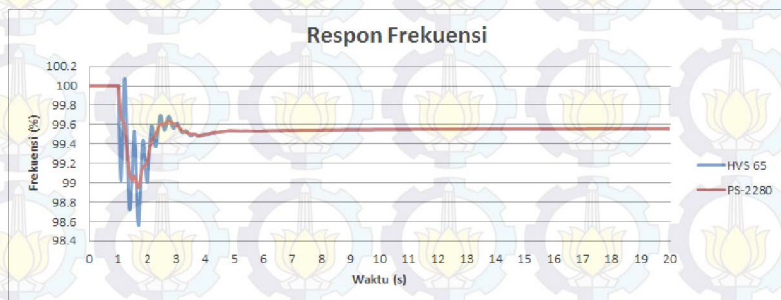
**Gambar 4.3** Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa respon sudut rotor dari generator TG66 dan GTG 100 mengalami osilasi. Hal ini diakibatkan karena sistem mengalami generator lepas secara tiba-tiba sehingga sudut rotor generator berosilasi beberapa saat. Pada Gambar 4.3 tersebut, respon sudut rotor terendah terjadi pada generator GTG 100 dengan nilai sudut rotor terendah ketika terjadi osilasi yaitu mencapai  $-10,18^\circ$  pada 1,151 detik dan respon sudut rotor tertinggi terjadi ketika  $2,63^\circ$  pada 1,301 detik. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor yang telah ditetapkan.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor masih berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon sudut tersebut. Namun, respon frekuensi sistem jika dibandingkan dengan batas aman frekuensi berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 belum memenuhi standar tersebut sehingga pada sistem harus dilakukan pelepasan beban/*load shedding* berdasarkan nilai frekuensi yang telah ditentukan dalam standar.

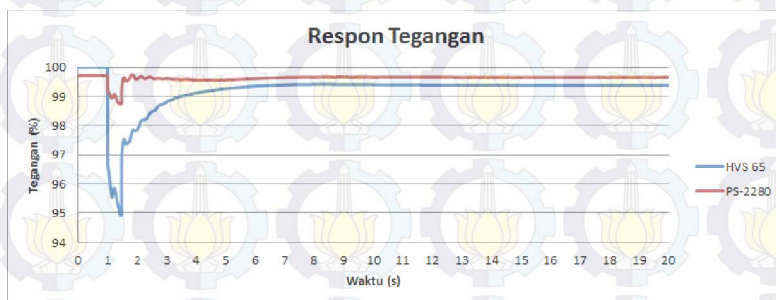
#### 4.3.1.2 1Gen.OFF + LS1: 1 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + *load shedding* 1 (LS1)

Pada kasus 1Gen.OFF + LS1 akan ditunjukkan hasil simulasi analisis kestabilan transien ketika pembangkit TG65 lepas pada saat sistem berjalan selama 1 detik dengan semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Jumlah total beban sistem adalah 53,935 atau 54 MW. Untuk mempertahankan frekuensi beroperasi pada kondisi yang telah ditentukan, total beban yang harus dilepas adalah 10% dari jumlah beban total tersebut.



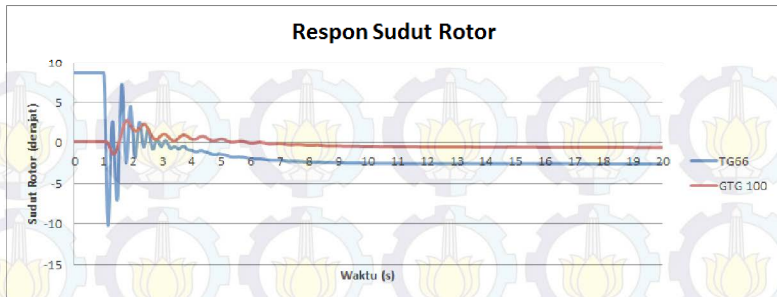
**Gambar 4.4** Respon frekuensi ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1).

Pada Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa ketika sistem sedang berjalan, 1 detik kemudian sistem mengalami gangguan lepas generator yaitu generator TG65. Frekuensi pada bus yang terhubung langsung dengan generator yaitu bus HVS 65 beresiliasi akibat pelepasan beban sebesar 5,5 MW hingga mencapai titik paling rendah yaitu sebesar 98,5579% pada 1,682 detik dan mencapai titik tertinggi pada 100,075% pada 1,211 detik. Pelepasan beban dilakukan ketika frekuensi sistem berada pada batas minimum standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu sebesar 98,84%. Batas frekuensi di bawah standar terjadi pada 98,812% di 1,351 detik. Pelepasan beban pertama membutuhkan waktu 6 *cycle* atau 0,12 detik. Sehingga, pelepasan beban sistem dilakukan pada  $1,351 + 0,12 = 1,471$  detik. Berdasarkan hasil pelepasan beban pertama, frekuensi sistem masih melebihi batas 100% namun masih dalam kondisi yang aman berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan.



**Gambar 4.5** Respon tegangan ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1).

Pada Gambar 4.5, dapat diketahui bahwa respon tegangan sistem naik secara drastis akibat adanya pelepasan beban pada sistem. Respon tegangan dibandingkan dengan Gambar 4.2 mengalami peningkatan yang mana berarti tegangan pada bus HVS 65 beroperasi pada kenaikan tegangan yang aman berdasarkan standar tegangan. Titik respon tegangan paling rendah terjadi pada 94,9145% pada 1,451 detik kemudian mulai naik hingga mengalami *steady state* pada 99,3901% di 6,762 detik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan pelepasan beban yang terhubung pada sistem sebesar 5,5 MW, respon tegangan kembali pada keadaan normal. Dengan kata lain, sistem dapat beroperasi dalam kondisi tersebut berdasarkan standar tegangan yang telah ditetapkan.



**Gambar 4.6** Respon sudut rotor ketika generator TG65 lepas dari sistem dan pelepasan beban 1 (LS1).

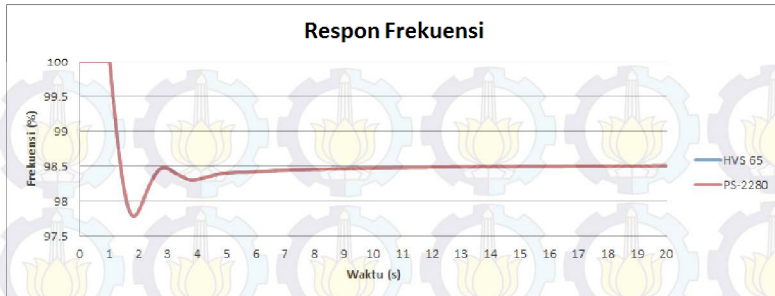
Pada Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa ketika 1 detik tiba-tiba sistem mengalami gangguan, respon sudut rotor pada generator TG66 terus berosilasi untuk mempertahankan kestabilan sistem. Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada  $-10,18^\circ$  di 1,151 detik. Sedangkan respon sudut rotor tertinggi terjadi pada  $7,25^\circ$  di 1,612 detik. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 1 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% atau sekitar 5,4-5,5 MW.

#### 4.3.1.3 2Gen.OFF : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ )

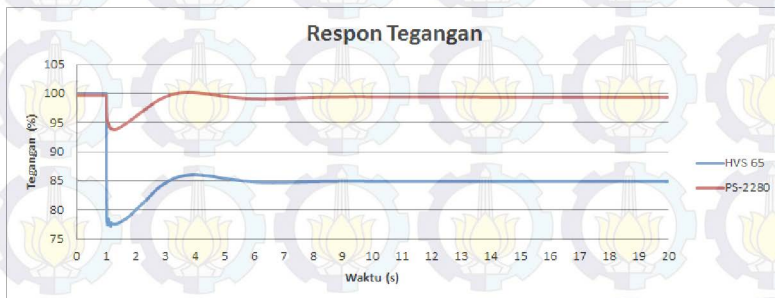
Pada kasus 2Gen.OFF ditunjukkan bahwa generator TG65 dan TG66 OFF ketika sistem berjalan selama 1 detik dengan asumsi semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati melalui simulasi transien pada bus yang mewakili beberapa tegangan yaitu bus PS-2280 (11,5 kV) dan bus HVS 65 (6 kV). Berikut pada Gambar 4.7 merupakan respon frekuensi ketika 2 generator lepas dari sistem.





**Gambar 4.7** Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem.

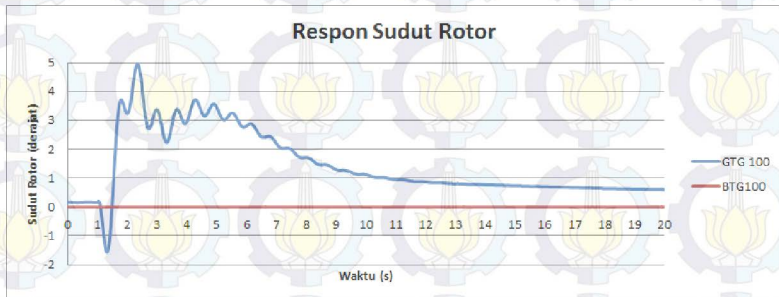
Pada Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa sistem beroperasi selama 1 detik sebelum terjadi gangguan 2 generator lepas dari sistem yaitu generator TG65 dan generator TG66. Lepasnya 2 generator tersebut mengakibatkan respon frekuensi yang menurun drastis pada 97,7826% di 1,811 detik. Frekuensi tersebut beresilasi hingga mencapai keadaan *steady state* yaitu pada 98,44% di 7,061 detik. Penurunan ini mengakibatkan frekuensi turun sehingga sistem berada pada kondisi yang belum aman. Oleh karena itu, perlu dilakukan pelepasan beban untuk mempertahankan frekuensi dikeadaan yang sesuai dengan batas standar frekuensi menurut IEEE Std C37.106-2003.



**Gambar 4.8** Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa sistem terjadi gangguan pada 1 detik kemudian sistem mengalami tegangan turun/*drop* tegangan akibat 2 generator lepas. Turunnya tegangan disebabkan oleh hilangnya

suplai daya dari generator TG65 dan TG66 ke beban dengan total daya sekitar 17 MW. Nilai paling rendah akibat adanya gangguan ini adalah 77,2039% yang terjadi pada 1,141 detik. Berdasarkan data respon tegangan tersebut, maka perlu dilakukan pelepasan beban sehingga *drop* tegangan dapat kembali sesuai standar yang telah ditetapkan.



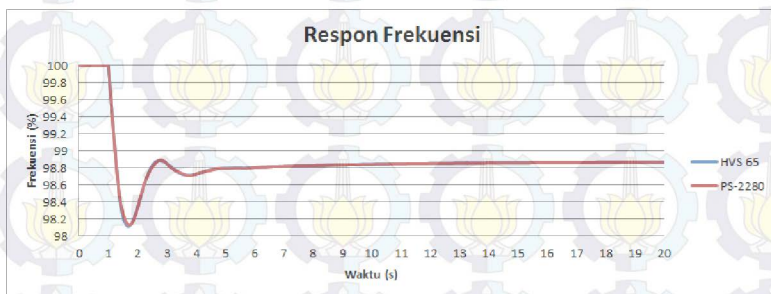
**Gambar 4.9** Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.9, respon sudut rotor BTG100 tetap bernilai  $0^\circ$ . Hal ini karena sudut rotor generator BTG100 merupakan referensi sudut generator lainnya. Sedangkan respon sudut rotor generator GTG 100 mengalami osilasi. Osilasi tertinggi terjadi pada  $4,94^\circ$  di 2,331 detik sedangkan osilasi terendah sistem terjadi ketika  $-1,57^\circ$  di 1,321 detik. Berdasarkan respon sudut rotor yang telah dijelaskan, sistem masih berada dalam kondisi aman sehingga dapat beroperasi dengan keadaan tersebut.

Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor ditetapkan dalam standar sehingga batas operasi yang aman dapat diketahui berdasarkan seluruh respon tersebut. Dari keseluruhan respon yang didapat, frekuensi dan tegangan tidak dalam kondisi yang aman sehingga perlu dilakukan pelepasan beban ke-1 untuk mengetahui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor apakah sudah berada pada kategori aman ataukah masih berada pada kategori kritis. Apabila setelah pelepasan beban tahap pertama dilakukan ternyata sistem masih berada pada kondisi yang tidak stabil, maka harus dilanjutkan dengan pelepasan beban ke-2 untuk melindungi sistem tersebut. Pelepasan beban harus dilakukan untuk menjaga sistem berada pada kondisi yang stabil sehingga sistem dapat beroperasi dengan baik.

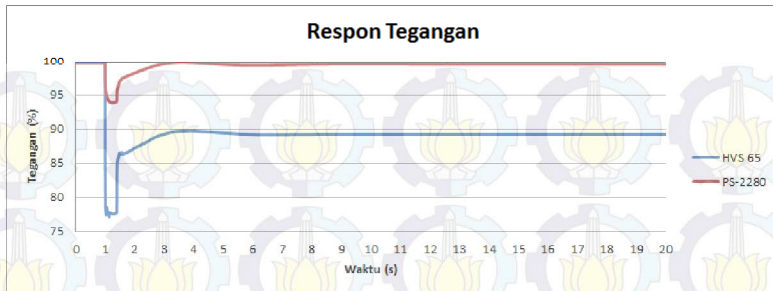
#### 4.3.1.4 2Gen.OFF + LS1 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load shedding 1 (LS1)

Pada kasus Gen2.OFF + load shedding 1 (LS1) ditunjukkan bahwa generator TG65 dan TG66 OFF ketika sistem berjalan selama 1 detik dengan asumsi semua pembangkit ON kecuali pembangkit PLN. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati melalui simulasi transien pada bus yang mewakili beberapa tegangan yaitu bus PS-2280 (11,5 kV) dan bus HVS 65 (6 kV). Berikut pada Gambar 4.10 merupakan respon frekuensi ketika 2 generator lepas dari sistem dengan pelepasan beban 1 (LS1).



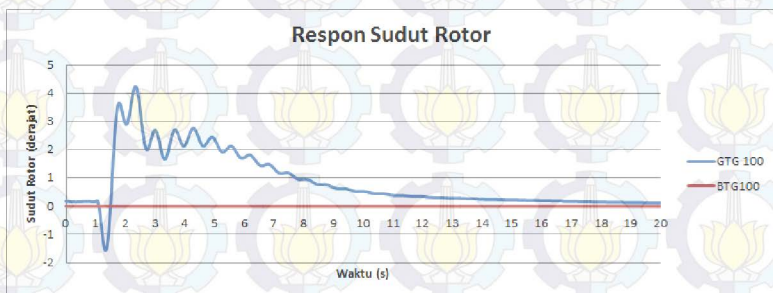
**Gambar 4.10** Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + load shedding 1 (LS1)

Pada Gambar 4.10 dapat diketahui bahwa sistem beroperasi selama 1 detik sebelum terjadinya gangguan. Ketika respon frekuensi berada pada batas bawah frekuensi standar yaitu sebesar 98,84%, maka pelepasan beban harus dilakukan. Pelepasan beban pertama dilakukan berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 saat frekuensi mencapai keadaan di bawah standar frekuensi yaitu 98,8191%. Pelepasan beban pertama sebesar 10% dari beban total yaitu sekitar 5,4–5,5 MW dan memerlukan waktu *delay* sebesar 6 *cycle* atau 0,12 detik. Prosentase sebesar 98,8191% diperoleh pada waktu 1,281 detik sehingga waktu pelepasan beban sistem harus dilakukan pada waktu  $1,281 + 0,12 = 1,401$  detik. Setelah dilakukan pelepasan beban pertama, respon frekuensi masih berada pada batas bawah standar yang ada. Sehingga berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan, maka perlu dilakukan pelepasan beban tahap 2 karena respon frekuensi berada pada nilai kurang dari 98,16% (pelepasan beban 2 langkah).



**Gambar 4.11** Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding* 1 (LS1)

Pada Gambar 4.11 diketahui bahwa respon tegangan pada bus HVS 65 mengalami kedip tegangan/*voltage sag* terendah hingga mencapai 77,2437% di 1,121 detik. Ketika pelepasan beban terjadi, tegangan mulai berangsur naik hingga mencapai diatas 85% hingga berada pada kondisi *steady state* sebesar 89,1642% di 6,332 detik. Berdasarkan respon tersebut jika dibandingkan dengan standar tegangan yang telah ditetapkan, respon tegangan belum memenuhi persyaratan standar tegangan yang dianjurkan. Sehingga perlu dilakukan pelepasan beban ke-2 untuk menjaga sistem kembali ke tegangan yang memenuhi standar sehingga peralatan industri dapat bekerja dengan baik.



**Gambar 4.12** Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding* 1 (LS1)

Pada Gambar 4.12, respon sudut rotor generator BTG100 berada pada 0°. Hal ini dapat disimpulkan bahwa sudut rotor generator BTG100 merupakan sudut rotor referensi terhadap sudut rotor generator lainnya.

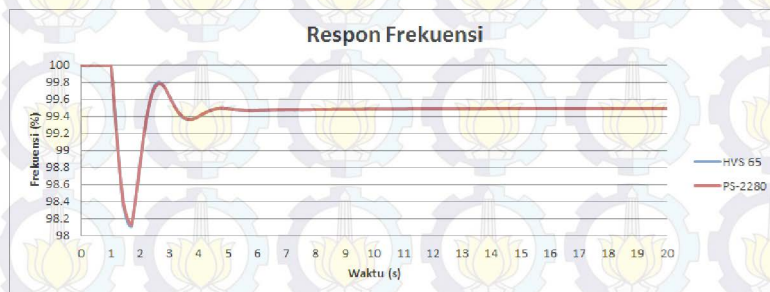


Sedangkan pada respon sudut rotor generator GTG 100 dapat diketahui bahwa ketika sistem mengalami gangguan pada 1 detik, respon sudut rotor mengalami osilasi hingga mencapai nilai terendah yaitu  $-1,56^\circ$  di 1,321 detik dan berada pada nilai tertinggi sebesar  $4,25^\circ$  di 2,332 detik. Dari perolehan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor generator masih berada dalam kondisi aman.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor setelah terjadi pelepasan beban pertama pada sistem, dapat diketahui bahwa respon frekuensi dan tegangan masih belum memenuhi persyaratan standar yang aman sehingga perlu dilakukan pelepasan beban tahap 2 (2 langkah) untuk menjaga kestabilan sistem.

#### 4.3.1.5 2Gen.OFF + LS2 : 2 generator lepas dari sistem ( $t=1s$ ) + load shedding 2 (LS2)

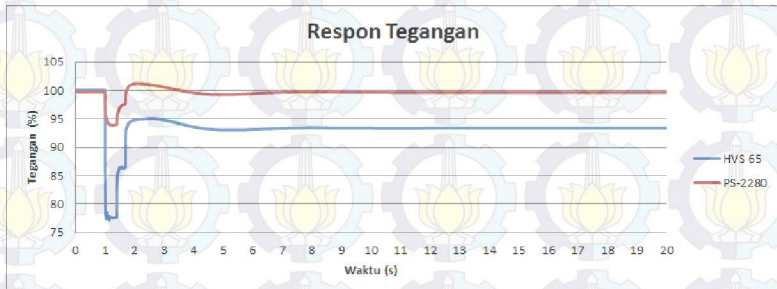
Pada kasus 2Gen.OFF + load shedding 2, sistem mengalami gangguan akibat lepasnya generator dari sistem ketika sistem sedang beroperasi selama 1 detik. Pelepasan beban ke-2 dilakukan karena respon frekuensi dan respon tegangan belum berada pada daerah yang aman berdasarkan standar tegangan dan frekuensi yang terdapat pada ANSI/IEEE C37.106-1987. Berikut pada Gambar 4.13 akan dijelaskan mengenai respon frekuensi sistem akibat lepasnya 2 generator yaitu generator TG65 dan generator TG66.



**Gambar 4.13** Respon frekuensi ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + load shedding 2 (LS2)

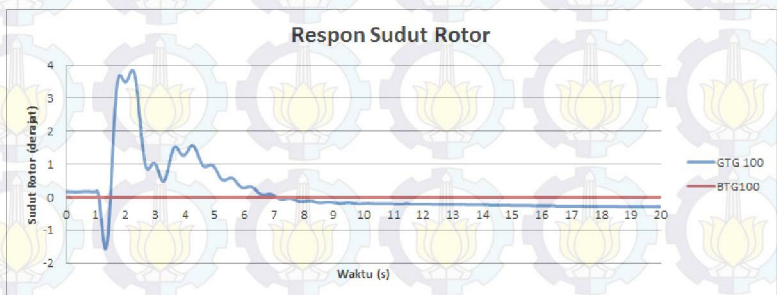
Pada gambar 4.13 dapat dianalisis bahwa frekuensi sistem mengalami penurunan akibat adanya gangguan pada 1 detik ketika sistem sedang beroperasi. Pelepasan beban pada sistem dilakukan ketika respon frekuensi mencapai nilai di bawah 98,16% (2 langkah)

berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan. Frekuensi berada pada nilai di bawah standar pertama kali yaitu sebesar 98,1557% di 1,572 detik. Pelepasan beban ke-2 memerlukan waktu *delay* sebesar 6 *cycle* atau 0,12 detik. Total pelepasan beban adalah 15% dari total beban yang ditanggung sistem atau sekitar 8,1-8,2 MW. Sehingga waktu pelepasan beban tahap 2 adalah  $1,572 + 0,12 = 1,692$  detik.



**Gambar 4.14** Respon tegangan ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding* 2 (LS2)

Pada Gambar 4.14 dapat diamati bahwa terjadi pelepasan beban ke-2 akibat respon tegangan yang turun. Dengan melepas total beban sebesar 15% dari beban total atau sekitar 8,1-8,2 MW, tegangan sistem mengalami kenaikan dibandingkan dengan ketika dilakukan pelepasan beban pertama. Kenaikan tegangan paling tinggi terjadi pada 95,0422% di 2,583 detik. Berdasarkan data tersebut, respon tegangan sudah berada pada kondisi yang aman sehingga sistem dapat bekerja dengan baik pada daerah tegangan ketika dilakukan pelepasan beban ke-2.



**Gambar 4.15** Respon sudut rotor ketika generator TG65 dan TG66 lepas dari sistem + *load shedding* 2 (LS2)

Pada Gambar 4.15, respon sudut rotor BTG100 bernilai  $0^\circ$  karena merupakan sudut rotor referensi generator. Sedangkan disisi lain, sudut rotor GTG 100 mengalami osilasi ketika sistem mengalami gangguan pada 1 detik mencapai nilai terendah yaitu sebesar  $-1,56^\circ$  di 1,321 detik dan mencapai nilai tertinggi pada  $3,86^\circ$  di 2,223 detik. Respon sudut rotor ini berada dalam kondisi *steady state* pada  $-0,18^\circ$  di 10,003 detik. Respon sudut rotor ini berdasarkan standar masih berada dalam kondisi yang aman sehingga sistem diperbolehkan beroperasi dengan keadaan tersebut.

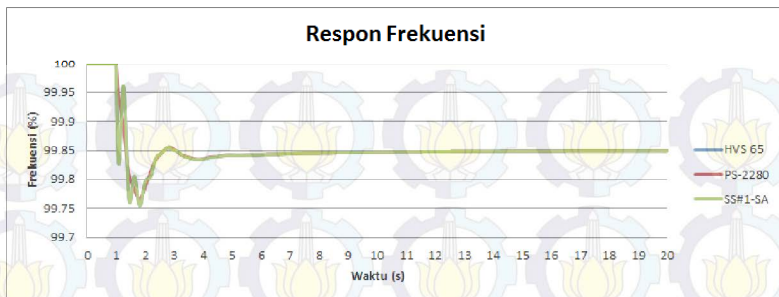
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada seluruh respon setelah dilakukan pelepasan beban ke-2, maka dapat disimpulkan bahwa sistem tersebut aman. Pada kondisi lepasnya 2 generator yaitu TG65 dan TG66, sistem harus melakukan pelepasan beban sebesar 25% dengan rincian 10% dilakukan pada pelepasan beban pertama dan 15% dilakukan pada pelepasan beban ke-2. Pelepasan beban sebesar 25% dari beban total harus segera diupayakan untuk mencapai keadaan sistem yang stabil. Jika tidak dilakukan maka dampak yang dapat terjadi semakin besar karena mampu menimbulkan resiko kerusakan pada alat-alat industri yang sedang beroperasi.

#### **4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien *Starting Motor***

Pada simulasi kestabilan transien *starting motor*, diasumsikan bahwa sebuah motor induksi tiga fasa akan dioperasikan/dihubungkan ke sistem sesaat setelah sistem beroperasi. Motor yang dioperasikan memiliki daya yang cukup besar sehingga memiliki pengaruh terhadap kestabilan sistem yang akan dianalisis. Respon kestabilan akan dipantau melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem kelistrikan dengan membandingkan nilai respon terhadap standar yang telah digunakan sebelumnya.

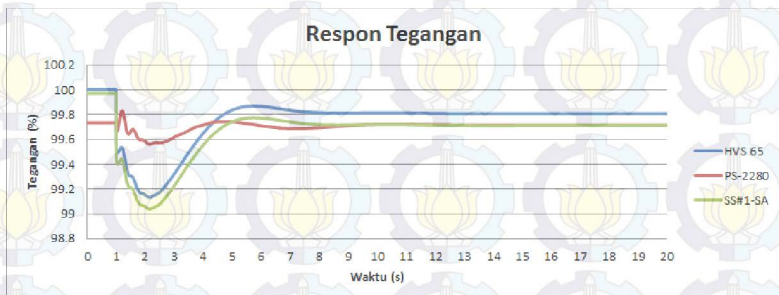
##### **4.3.2.1 MS1 : 1 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 1 detik ( $t=1s$ )**

Pada kasus MS1 yaitu motor akan beroperasi ketika sistem baru beroperasi selama 1 detik. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati dengan mempertimbangkan referensi standar tegangan yang berdasar pada IEEE Std C37.106-2003. Motor yang akan beroperasi merupakan motor induksi tiga fasa dengan ID motor yaitu MC-1301 yang memiliki kapasitas daya 4000 kW. Berikut pada Gambar 4.16 akan dilihat respon frekuensi sistem ketika motor di-*start*.



**Gambar 4.16** Respon frekuensi ketika motor MC-1301 *start* dari sistem.

Pada Gambar 4.16 dapat diketahui bahwa motor MC-1301 dihubungkan ke sistem ketika sistem sedang beroperasi selama 1 detik. Frekuensi pada bus SS#1-SA (6 kV) mengalami penurunan sesaat akibat arus *start* motor besar hingga bisa mencapai 6-10 kali arus nominal motor. Penurunan frekuensi tersebut berada pada titik terendah yaitu 99,7546% di 1,821 detik. Sedangkan kenaikan frekuensi tertinggi setelah *start* motor berada pada 99,9611% di 1,251 detik. Berdasarkan standar frekuensi yang telah ditetapkan, respon frekuensi ini masih berada dalam kondisi aman sehingga sistem penyalan/*start* motor dengan daya sebesar 4000 kW yaitu motor MC-1301 tidak mengganggu sistem kelistrikan secara umum.

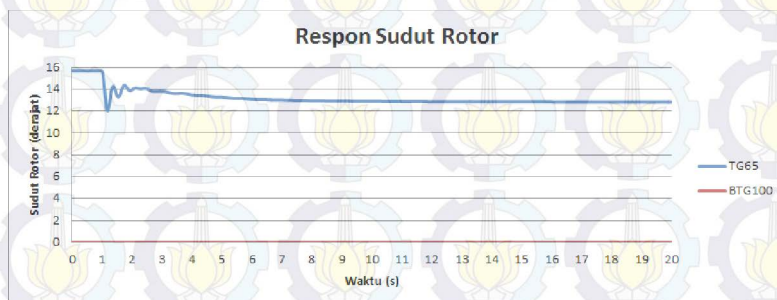


**Gambar 4.17** Respon tegangan ketika motor MC-1301 *start* dari sistem.

Pada Gambar 4.17 dapat diketahui bahwa respon tegangan seketika mengalami penurunan akibat *starting motor* MC-1301 pada bus SS#1-



SA. Penurunan tegangan diakibatkan adanya arus *start* motor dengan daya besar yang dihubungkan ke sistem. Arus yang dibutuhkan untuk *start* umumnya sebesar 6-10 kali arus nominal motor. Dengan daya yang tetap, maka melonjaknya arus *start* akan mempengaruhi tegangan sistem sesaat ketika motor mulai dihubungkan pada bus tersebut. Penurunan tegangan terendah yang terjadi akibat adanya *start* motor MC-1301 adalah 99,0378% di 2,151 detik. Sedangkan respon keadaan *steady state* pada bus SS#1-SA setelah motor dihubungkan ke sistem yaitu terdapat pada 99,7157% di 8,451 detik. Berdasarkan kondisi respon tegangan tersebut, respon tegangan masih berada pada kategori aman sehingga motor dengan daya 4000 kW masih boleh beroperasi ketika sistem sedang berjalan karena *drop* tegangan yang terjadi masih berada pada rentang aman berdasarkan standar tegangan.



**Gambar 4.18** Respon sudut rotor ketika motor MC-1301 *start* dari sistem.

Pada Gambar 4.18 dapat dianalisis bahwa respon sudut rotor generator BTG100 berada pada nilai  $0^\circ$ . Hal ini disebabkan karena sudut rotor generator BTG100 merupakan sudut referensi generator sistem. Sedangkan disisi lain, respon sudut rotor TG65 dapat diketahui bahwa sistem mengalami gangguan pada 1 detik ketika sistem sedang beroperasi. Nilai terendah yang diakibatkan oleh gangguan ini adalah sebesar  $12,03^\circ$  di 1,191 detik. Sedangkan respon tertinggi akibat gangguan yaitu  $14,36^\circ$  di 1,751 detik.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada kasus *starting motor* MC-1301 dapat disimpulkan bahwa sistem tidak mengalami masalah berarti akibat adanya arus *start* motor MC-1301

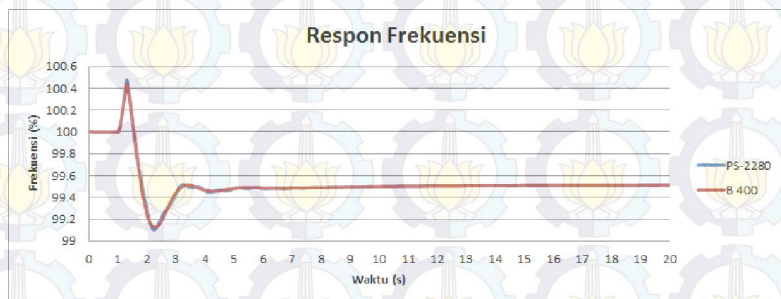
yang relatif besar. Keseluruhan respon masih berada pada kategori aman berdasarkan standar yang ada.

#### 4.3.3 Simulasi Kestabilan Transien Hubung Singkat / *Short Circuit*

Pada simulasi kestabilan transien akibat hubung singkat pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik, diasumsikan bahwa terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada salah satu bus yang ada pada sistem. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati setelah sistem mengalami gangguan. Kemudian, respon yang dihasilkan setelah terjadinya gangguan hubung singkat tiga fasa akan dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan untuk menentukan langkah-langkah yang harus dilakukan untuk tetap mempertahankan kestabilan sistem tenaga.

##### 4.3.3.1 SC1 : Hubung Singkat / *Short Circuit 1* (SC1)

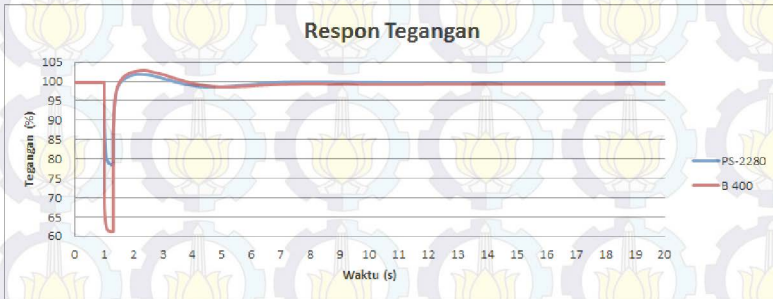
Pada kasus hubung singkat 1, diasumsikan terjadi hubung singkat pada bus HVS 65 (6 kV) setelah sistem beroperasi selama 1 detik. *Circuit breaker* beroperasi seketika yaitu sebesar 0,3 detik ketika bus mengalami hubung singkat tiga fasa untuk mengamankan sistem. Berikut pada Gambar 4.19 adalah respon frekuensi pada kasus hubung singkat 1.



**Gambar 4.19** Respon frekuensi ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.

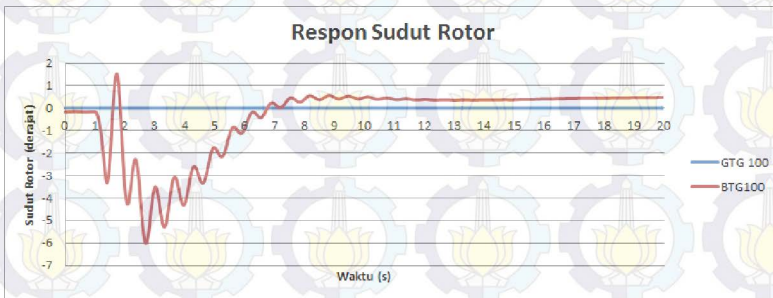
Pada Gambar 4.19 dapat diketahui bahwa respon frekuensi meningkat dengan cepat karena adanya beban pada sistem cukup besar yang hilang akibat adanya gangguan hubung singkat hingga frekuensi menyentuh angka tertinggi pada 100,446% di 1,301 detik. Gangguan tersebut kemudian dilepaskan dari sistem saat 0,3 detik dengan

membuka CB TG9 untuk melindungi sistem agar tetap dapat beroperasi sehingga respon frekuensi turun sesaat kemudian beresilasi hingga kondisi sistem stabil pada 99,4844% di 6,361 detik.



**Gambar 4.20** Respon tegangan ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada Gambar 4.20 dapat dianalisis bahwa sistem mengalami *drop* tegangan dengan sangat cepat ketika mengalami gangguan pada 1 detik. Tegangan pada pusat gangguan turun drastis sehingga membuat arus mengalir ke pusat gangguan. Untuk mempertahankan sistem, maka gangguan hubung singkat di bus HVS 65 harus segera dihilangkan dengan cara membuka CB pada daerah yang mengalami gangguan yaitu CB TG9. Respon tegangan ketika sistem pada bus HVS 65 dilepas adalah terjadi peningkatan tegangan mencapai nilai tertinggi pada 102,82% di 2,321 detik. Setelah itu keadaan tegangan menjadi lebih stabil dengan titik kestabilan yang dicapai pada 99,241% di 7,031 detik.



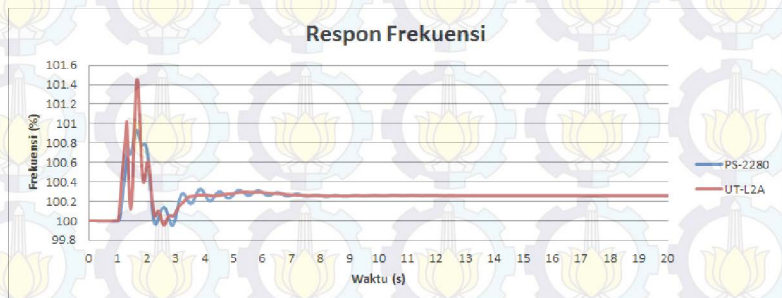
**Gambar 4.21** Respon sudut rotor ketika bus HVS 65 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada Gambar 4.21 respon sudut rotor generator GTG 100 bernilai  $0^\circ$  karena sudut rotor pada generator tersebut dijadikan referensi terhadap sudut rotor generator lain. Pada kasus ini dapat dilihat bahwa respon sudut rotor generator yang letaknya dekat dengan lokasi terjadinya gangguan hubung singkat mengalami osilasi selama beberapa detik akibat adanya gangguan dan pelepasan gangguan dari sistem sehingga sudut rotor akan beroperasi untuk mencapai nilai kestabilannya. Sudut rotor generator BTG100 mengalami kenaikan sudut rotor tertinggi pada  $1,53^\circ$  di 1,721 detik dan penurunan terendah pada  $-6,02^\circ$  di 2,691 detik. Respon sudut rotor berada pada titik yang stabil pada  $0,35^\circ$  di 13,081 detik.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem masih berada pada kategori yang aman. Hal ini didasarkan pada standar yang mengacu pada IEEE Std C37.106-2003 (*Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987*).

#### 4.3.3.2 SC2 : Hubung Singkat / *Short Circuit 2* (SC2)

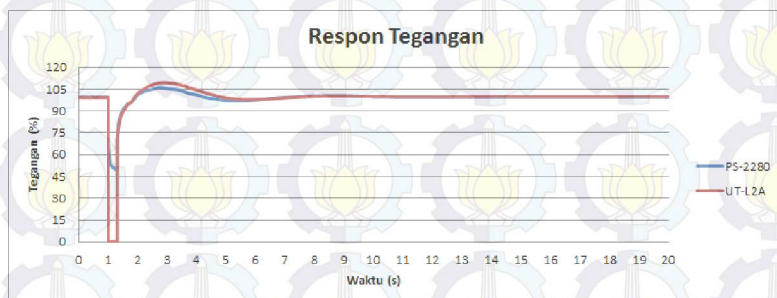
Pada kasus SC2 yaitu kasus hubung singkat 2 yang terjadi pada bus HVS-27 (20 kV). Gangguan hubung singkat terjadi pada sistem ketika sistem baru beroperasi selama 1 detik. Untuk mengamankan peralatan, maka CB 02CB33 beroperasi seketika dengan waktu operasi 0,3 detik setelah gangguan. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati dengan membandingkan hasil respon sistem *existing* dan standar yang telah ditetapkan pada ANSI/IEEE C37.106-1987. Pada Gambar 4.22 berikut akan ditunjukkan respon frekuensi sistem ketika gangguan berlangsung setelah 1 detik.



**Gambar 4.22** Respon frekuensi ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.



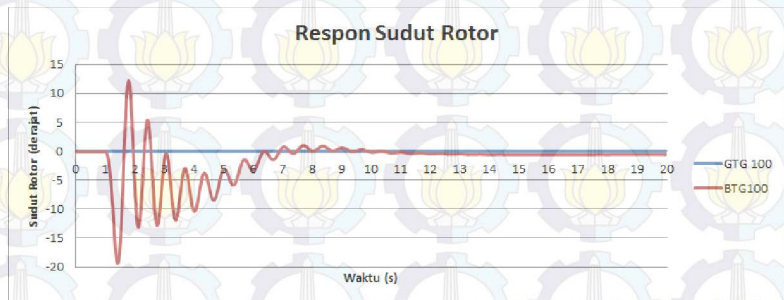
Pada Gambar 4.22 dapat diketahui bahwa sistem beroperasi selama 1 detik sebelum sistem mengalami gangguan hubung singkat di bus HVS-27 (20 kV). Respon frekuensi naik dengan cepat ketika sistem mengalami gangguan dengan keadaan frekuensi paling tinggi terdapat pada 101,453% di 1,661 detik. Respon tersebut berada dalam kondisi *steady state* sebesar 100,255% di 8,191 detik. Kenaikan frekuensi berhubungan erat dengan kecepatan putar rotor suatu generator. Semakin tinggi kenaikan frekuensi yang terjadi, maka semakin tinggi juga kecepatan putar rotor generator. Hal ini karena frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan (rpm). Namun, berdasarkan hasil respon frekuensi tersebut, frekuensi masih berada pada kategori aman.



**Gambar 4.23** Respon tegangan ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada gambar 4.24 dapat dianalisis bahwa tegangan bus yang terletak dekat dengan bus yang mengalami gangguan yaitu bus UT-L2A mengalami penurunan tegangan dengan sangat cepat ketika sistem mengalami gangguan hubung singkat. Tegangan pada bus turun akibat adanya arus gangguan yang cukup besar ke sistem sehingga mengakibatkan *drop* tegangan yang cukup besar. Untuk melindungi sistem agar tetap dapat beroperasi maka dilakukan pembukaan CB yaitu CB 02CB33 yang terletak tepat di atas bus UT-L2A. Pembukaan CB dilakukan pada 0,3 detik setelah sistem mengalami gangguan hubung singkat. Respon tegangan setelah dilakukannya pembukaan CB untuk menetralkan gangguan dapat dilihat bahwa sistem langsung kembali ke keadaan normal meskipun terjadi kenaikan tegangan/*voltage swell* akibat *switching* beban yang cukup besar. Kenaikan tegangan tertinggi

terjadi pada 109,432% di 2,871 detik. Respon tegangan mencapai keadaan *steady state* sebesar 100,235% di 8,651 detik.



**Gambar 4.24** Respon sudut rotor ketika bus HVS-27 mengalami gangguan hubung singkat.

Pada Gambar 4.24, respon sudut rotor GTG 100 berada pada posisi  $0^\circ$ . Sehingga dapat diketahui bahwa sudut rotor GTG 100 digunakan sebagai referensi sudut rotor generator lainnya. Respon generator lainnya seperti generator BTG100 mengalami osilasi akibat adanya gangguan hubung singkat pada bus HVS-27. Penurunan sudut rotor terendah terjadi pada  $-19,38^\circ$  di 1,401 detik sedangkan kenaikan sudut rotor tertinggi terjadi pada  $12,16^\circ$  di 1,781 detik. Respon sudut rotor yang diperlihatkan pada Gambar 4.24 masih berada pada kategori aman sehingga sistem masih diperbolehkan beroperasi dalam keadaan tersebut.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa sistem masih berada pada kondisi aman ketika bus HVS-27 mengalami gangguan dan CB 02CB33 terbuka dari sistem 0,3 detik setelah gangguan hubung singkat. Pada keadaan ini, sistem masih diizinkan untuk tetap beroperasi berdasarkan standar yang telah ditetapkan.

#### 4.4 Rekapitulasi Data Kestabilan di PT. Petrokimia Gresik

Hasil seluruh respon sistem akibat adanya gangguan lepasnya generator, *starting motor*, dan hubung singkat utamanya respon frekuensi dan tegangan sistem terdapat pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.5 berikut:

**Tabel 4.2** Rekapitulasi data *load shedding*

Studi Kasus	Load Shedding	Waktu (s)	Beban (%)	MW
Gen1.OFF	1	1,471 s	10 %	5,5 MW
Gen2.OFF	1	1,401 s	10%	5,5 MW
	2	1,692 s	15%	8,2 MW
Total			25%	13,7 MW

**Tabel 4.3** Rekapitulasi data studi kasus generator lepas

Studi Kasus	Bus ID	f min. (%)	Waktu (s)	V min. (%)	Waktu (s)	Kondisi	
						f	V
1Gen.OFF	HVS 65	98,517	1,681	94,5478	1,751	x	√
1Gen.OFF + LS1	HVS 65	98,5579	1,682	94,9145	1,451	√	√
2Gen.OFF	HVS 65	97,7826	1,811	77,2039	1,141	x	x
2Gen.OFF + LS1	HVS 65	98,8191	1,281	77,2437	1,121	x	x
2Gen.OFF + LS2	HVS 65	98,1557	1,572	86,2679	1,592	√	√

**Tabel 4.4** Rekapitulasi data studi kasus *starting motor*

Studi Kasus	Bus ID	f min. (%)	Waktu (s)	V min. (%)	Waktu (s)	Kondisi	
						f	V
MS1	SS#1-SA	99,7546	1,821	99,0378	2,151	√	√

**Tabel 4.5** Rekapitulasi data studi kasus hubung singkat

Studi Kasus	Bus ID	f max. (%)	Waktu (s)	V max. (%)	Waktu (s)	Kondisi	
						f	V
SC1	B 400	100,446	1,301	102,82	2,321	√	√
SC2	UT-L2A	101,453	1,661	109,432	2,871	√	√





## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suhadi dkk, “**Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1 untuk SMK**”, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, 2008.
- [2] Suswanto, Daman, “**Diktat Kuliah: Sistem Distribusi Tenaga Listrik**”, Teknik Elektro Universitas Negeri Padang, Padang.
- [3] Marsudi, Djiteng, “**Operasi Sistem Tenaga Listrik**”, Yogyakarta : Graha Ilmu, 2006.
- [4] Saadat, Hadi, “**Power System Analysis**”, McGraw-Hill Inc., 1999.
- [5] Soeprijanto, Adi. “**Desain Kontroler untuk Kestabilan Dinamik Sistem tenaga Listrik**”. ITS Press, Surabaya, 2012.
- [6] Sulasno, “**Analisa Sistem Tenaga Listrik**”, Satya Wacana, Semarang, 1993.
- [7] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “**Definition and Classification of Power System Stability**”, IEEE Transactions on Power System , Vol. 19, No. 2, May 2004
- [8] ANSI/IEEE C37.106-1987, “**IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants**”.
- [9] Moreno-Munoz, Antonio-Munoz.”**Power Quality, Mitigation Technologies in a Distributed Environment**”. Área de Electrónica Universidad de Córdoba Campus de Rabanales 14071 Córdoba.Spanyol.Springer.2007.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Gangguan lepasnya generator pada kasus 1Gen.OFF dan 2Gen.OFF sebelum dilakukannya *load shedding* dari sistem, mengakibatkan kondisi kestabilan sistem berpotensi membahayakan kelistrikan PT. Petrokimia Gresik. Kasus tersebut menyebabkan penurunan frekuensi terendah pada bus HVS 65 sebesar 98,517% di 1,681 detik dan 97,7826% di 1,811 detik.
- 2) Pelepasan beban/*load shedding* pada kasus 1Gen.OFF sebesar 5,5 MW dan 2Gen.OFF sebesar 13,7 MW harus dilakukan untuk mempertahankan kestabilan sistem kembali pada keadaan yang diizinkan berdasarkan pada standar frekuensi ANSI/IEEE Std C37.106-2003.
- 3) *Starting motor* dengan daya sebesar 4000 kW (MC-1301) di PT. Petrokimia Gresik secara langsung ketika 4 generator beroperasi masih diizinkan. *Starting motor* MC-1301 menyebabkan penurunan respon frekuensi terendah sebesar 99,7546% di 1,821 detik dan penurunan respon tegangan terendah sebesar 99,0378% di 2,151 detik.
- 4) Gangguan hubung singkat/*short circuit* dapat mengakibatkan respon frekuensi dan tegangan sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik menjadi tidak stabil. Namun, sistem pengamanan bekerja dengan baik pada 0,3 detik setelah gangguan pada bus HVS 65 (6 kV) sehingga respon frekuensi di bus B 400 menjadi stabil hingga mencapai keadaan *steady state* sebesar 99,4844% di 6,361 detik dan respon tegangan berada dalam kondisi yang sama pada 99,421% di 7,031 detik. Sedangkan pada kasus hubung singkat di bus HVS-27 (20 kV), respon frekuensi di bus UT-L2A berada dalam kondisi *steady state* sebesar 100,255% di 8,191 detik dan respon tegangan berada dalam kondisi yang sama pada 100,235% di 8,651 detik.



## 5.2 Saran

- 1) Apabila pada sistem terdapat prioritas beban, maka pelepasan beban dilakukan terutama pada beban-beban yang tidak terlalu berpengaruh pada sistem produksi di pabrik tersebut.
- 2) Dalam perancangan pelepasan beban, beban-beban yang dilepas sebaiknya berada didekat generator yang mengalami gangguan.

# LAMPIRAN A SINGLE LINE DIAGRAM PT. PETROKIMIA GRESIK



